

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Vytvoření měřicího pracoviště pro sledování vlivů
atmosférických jevů pro optický spoj**

**Measuring Workplace Creation for Observation of
Atmospheric Phenomena Influence on the Optical Link**

2015

Bc. Martin Chrenšć

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Chrenš**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: Vytvoření měřicího pracoviště pro sledování vlivů atmosférických jevů
pro optický spoj
Measuring Workplace Creation for Observation of Atmospheric
Phenomena Influence on the Optical Link

Zásady pro vypracování:

Diplomová práce se zabývá vytvořením měřicího pracoviště pro sledování vlivů atmosférických jevů pro optický bezvláknový spoj umístěný mezi budovou rektorátu A a věží hvězdárny umístěnou v Krásném poli. Úkolem studenta bude pomocí vhodného rozhraní propojit Raspberry Pi a optický bezvláknový spoj a poté zhotovit softwarovou aplikaci pro logování dat. Nedílnou součástí práce bude i vytvoření webového rozhraní pro grafické vyhodnocení a sledování logovaných dat.

1. Popis bezvláknového optického spoje umístěného mezi rektorátem budovy A a hvězdárnou Johana palisy.
2. Popis atmosférických jevů pro optický bezvláknový spoj.
3. Sestrojení logovací jednotky a propojení bezvláknového optického spoje s Raspberry Pi.
4. Vytvoření webového rozhraní pro grafické vyhodnocení a sledování logovaných dat.
5. Vyhodnocení naměřených dat z bezvláknového optického spoje z hlediska vlivu atmosférických jevů.

Seznam doporučené odborné literatury:

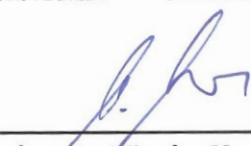
- [1] SALEH, B. E. A. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-00-6
- [2] WILFERT, O., KOLKA, Z. *Statistical model of free-space optical data link*. In: Proc. of The International Symposium on Optical Science and Technology. Conference 5550. Denver: SPIE. 2004, p. 203-213.
- [3] WILFERT, O. *Optoelektronika*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [4] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. *Laser Beam Scintillation with Applications*. Washington: SPIE Press, 2001.
- [5] SHIRAI, T.; DOGARIU, A.; WOLF, E. *Directionality of some model beams propagating in atmospheric turbulence*. Optics Letters, 2003, Vol. 28, No. 8, pp. 610-612. ISSN 0146-9592.
- [6] HENNIGER, H.; WILFERT, O. *An Introduction to Free-space Optical Communications*. Radioengineering. 2011, Vol. 19, No. 2, pp. 203-212. ISSN 1210-2512.
- [7] ANDREWS, L., C.; PHILLIPS, R., L.; HOPEN, C., Y.; ALHABASH, M., A. *Theory of optical scintillation*. Journal of the Optical Society of America A. 1999, Vol. 16, No. 6, p. 1417 – 1429. ISSN 0740-3232.
- [8] RICKLIN, J., C.; DAVIDSON, F., M. *Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: Implications for free-space laser communication*. Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision, 2002, Vol. 19, No 9, pp. 1794-1802. ISSN 1084-7529.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

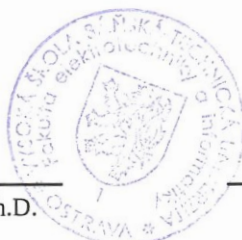
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som tuto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 4. mája 2015


.....
podpis študenta

Podakovanie

Rád by som poďakoval Ing. Janovi Látalovi za odbornú pomoc a konzultácie pri vytváraní tejto diplomovej práce. Ďalej by som rád poďakoval Ing. Lukášovi Hájekovi za pomoc pri vytváraní modelov v programe Matlab a ďalšie cenné rady v danej oblasti.

Abstrakt

Táto práca je zameraná na vytvorenie meracieho pracoviska pre zisťovanie vplyvu atmosférických javov na optický bezvláknový spoj. Na začiatku práce je popísaný vývoj technológie, princíp a použitie optického bezvláknového spoja v praxi. Nasleduje popis vplyvov atmosférických javov, ktoré negatívne ovplyvňujú optický bezvláknový spoj.

Praktickou časťou práce je vytvorenie meracieho pracoviska pre zisťovanie vplyvu atmosférických javov na tento spoj. V práci je použitý profesionálny optický bezvláknový spoj, ktorý je umiestnený v areáli univerzity. Vytvorené meracie pracovisko umožňuje sťahovanie dát z profesionálneho optického bezvláknového spoja a z univerzitnej meteorologickej stanice. Dáta sú vykresľované do grafov na webovej stránke, ktorá bola vytvorená ako súčasť práce.

Poslednou časťou práce je vyhodnocovanie vplyvu atmosférických javov na optický bezvláknový spoj s pomocou výpočtu štruktúrneho parametru indexu lomu v atmosfére a predikcia RSSI pomocou meteorologických veličín.

Kľúčová slova

Optický bezvláknový spoj; FSO; Bezvláknová optika; Atmosférické javy; Štruktúrny parameter indexu lomu; Model PAMELA; M-M model; eM-M model

Abstract

The thesis deals with the creation of measuring workplace for observation of atmospheric phenomena influence on the optical link. The technology development, principle and application of free space optic are described at the beginning of the work. The following is a description of the effects of atmospheric phenomena which have negative influence on the optical wireless link.

The practical part includes the creation of measuring workplace for observation of atmospheric phenomena influence on the optical link. In the thesis is used a professional free space optic link, which is located on campus. Created measuring station allows downloading data from professional optical link and from university weather station. The data are portrayed on a graph on a web page, which was created as part of the thesis.

The last part is the analysis of the atmospheric phenomena influence in the FSO by calculating the refractive index structure parameter in the atmosphere and RSSI prediction using meteorological variables.

Key words

Free space optic; FSO; OWC; Atmospheric phenomena; Refractive index structure parameter; PAMELA model; M-M model; eM-M model

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Jednotky	Význam symbolov
$\Delta\lambda$	nm	Pásmová prepust'
λ	nm	Vlnová dĺžka
λ_c	nm	Medzná vlnová dĺžka fotónu
W_g	eV	Zakázaný pás atómu
h	J.s ⁻¹	Plancková konštanta
ρ	A/W	Citlivosť detektora
η	-	Kvantová účinnosť
V_{BR}	V	Prierazné napätie diódy
Re	-	Reynoldsové číslo
l_0	mm	Kolomogorvák mikromierka
C_n^2	m ^{-2/3}	Štrukturálny parameter indexu lomu
C_T^2	deg ² . m ^{-2/3}	Štrukturálny parameter teploty
u_*	m.s ⁻¹	Rýchlosť trenia
ϕ	K	Potenciálová teplota vzduchu
k	-	Von Karmanová konštanta
g	m.s ⁻²	Gravitačné zrýchlenie
ϕ_*	K	Potenciálna miera teploty
h_0	m	Výška porastu
h_e	m	Priemerná výška porastu
ψ_1	-	Stabilita tlaku
V	km	Meteorologická viditeľnosť
δ	-	Koeficient veľkosti častíc
ϵ_0	-	Dielektrická konštanta (permitivita)

f	Hz	Oscilačná frekvencia
c	m.s^{-1}	Rýchlosť svetla
σ_a	-	Absorpcia priecnej časti
N_a	-	Koncentrácia absorbujúcich častíc
ν_0	Hz	Frekvencia vlny svetla
E_i	-	Nižšia energetická hladina
E_j	-	Vyššia energetická hladina
T	K	Teplota vzduchu
p	mb	Tlak vzduchu
L	m	Rozmer viskózneho prúdenia
ν	m.s^{-1}	Kinetická viskozita kvapalín
Φ_h	K.m^{-1}	Teplotný gradient
P	-	Pasquillová stabilita
c_r	-	Trieda žiarenia
c_w	-	Trieda rýchlosti vetra
$\overline{v_0}$	m.s^{-1}	Priemerná rýchlosť vetra
Φ_m	-	Bezrozmerný strih vetra
W	-	Váha hodín
RH	%	Relatívna vlhkosť
A	-	Zemský činiteľ odrazu
U	m.s^{-1}	Rýchlosť vetra
h_i	m	Výška inverznej vrstvy nad úrovňou mora
h	km	Nadmorská výška
C_s	mm	Prierez častíc
I_0	W/m^2	Intenzita žiarenia
H_0	-	Nulová hypotéza
H_A	-	Alternatívna hypotéza

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
AMOS	Air Force's geophysics Laboratory	Geofyzikálne laboratórium vzdušných síl
APD	Avalanche photodiode	Lavínová fotodióda
BER	Bit error ratio	Bitová chybovosť
DPPM	Differential pulse-position modulation	Diferenciálna impulzná polohová modulácia
FOV	Field of view	Zorné pole
FSK	Frequency shift keying	Frekvenčné kľúčovanie
FSO	Free space optic	Optický bezvláknový spoj
GIS	Geographic information system	Geografický informačný systém
IM	Intensity modulation	Intenzitná modulácia
IR (area)	Infrared (area)	Infračervená (oblasť)
LAN	Local area network	Lokálna sieť
LoS	Line of sight	Priama viditeľnosť
MAN	Metropolitan area network	Metropolitná sieť
PSK	Phase shift keying	Fázové kľúčovanie
RF	Radio frequency	Rádiový signál
RSSI	Received signal strength indicator	Indikátor sily prijatého signálu
SBR	Solar background radiation	Slnčné žiarenie na pozadí
SDH	Synchronous digital hierarchy	Synchrónna digitálna hierarchia
SLC	Submarine Lase Communication	Podmorská laserová komunikácia
SNR	Signal to noise ratio	Odstup signálu od šumu
SONET	Synchronous optical networking	Synchrónna optická sieť
UTP	Unshielded twisted pair	Netienená krútená dvojlinka
VPN	Virtual private network	Virtuálne privátne siete
WAN	Wide area network	Rozsiahla sieť
WDM	Wavelength-division multiplexing	Vlnový multiplex

Obsah

Úvod.....	- 14 -
1 Optický bezvláknový spoj	- 15 -
1.1 Vývoj FSO technológie	- 16 -
1.2 Vlnová dĺžka vo FSO	- 18 -
1.3 Princíp FSO	- 19 -
1.4 Optické zdroje vo FSO	- 20 -
1.4.1 LED	- 20 -
1.4.2 Lasery	- 22 -
1.4.3 Kritéria laserov pre FSO systémy	- 25 -
1.5 Prijímače vo FSO	- 25 -
1.5.1 Polovodičová fotodióda	- 26 -
1.5.2 PIN dióda	- 27 -
1.5.3 Lavínová fotodióda APD	- 28 -
1.5.4 Kritéria prijímačov pre FSO systémy	- 29 -
1.6 Konfigurácia FSO spojov	- 30 -
1.7 Topológie FSO	- 32 -
1.7.1 Topológia typu bod-viacbodov	- 32 -
1.7.2 Topológia typu mesh	- 33 -
1.7.3 Topológia kruh	- 33 -
2 Vplyv atmosféry na FSO	- 35 -
2.1 Straty atmosférického kanálu	- 35 -
2.1.1 Optické straty	- 36 -
2.1.2 Geometrické straty	- 36 -
2.1.3 Straty spôsobené zameraním systému	- 37 -
2.2 Beerov zákon	- 37 -
2.3 Beer Lambertov zákon	- 37 -
2.4 Rozptyl	- 38 -
2.4.1 Geometrický rozptyl	- 38 -
2.4.2 Rayleigho rozptyl	- 39 -

2.4.3	Mieov rozptyl	- 40 -
2.5	Absorpcia	- 41 -
2.5.1	Atmosférické prenosové okno	- 41 -
2.5.2	Absorpcia atmosféry	- 42 -
2.6	Turbulencie	- 45 -
2.6.1	Turbulentné prúdenie energie	- 46 -
2.6.2	Optické turbulencie	- 47 -
2.7	Štrukturálny parameter indexu lomu	- 47 -
2.7.1	Prízemná vrstva	- 48 -
2.7.2	Medzná vrstva	- 56 -
2.7.3	Vyššia vrstva	- 56 -
2.8	Putovanie lúča	- 57 -
2.9	Scintilácia	- 57 -
2.10	Šírenie lúča	- 59 -
2.11	Vplyv počasia	- 60 -
2.11.1	Dážď	- 60 -
2.11.2	Sneh	- 60 -
2.11.3	Hmla	- 61 -
2.12	Priama viditeľnosť (LoS)	- 67 -
2.12.1	Určenie LoS	- 67 -
2.12.2	Viditeľnosť	- 67 -
2.12.3	Vzdialenosť	- 68 -
2.13	Šírka pásma	- 68 -
2.14	Výber vlnovej dĺžky prenosu	- 68 -
3	Meracie pracovisko	- 70 -
3.1	Fyzická vrstva	- 70 -
3.1.1	Optická bezvláknová hlavica	- 70 -
3.1.2	Smerovač ASUS	- 73 -
3.1.3	Raspberry Pi	- 73 -
3.2	Konfigurácia prvkov	- 74 -
3.2.1	Optická bezvláknová hlavica	- 74 -

3.2.2	Smerovač ASUS.....	- 75 -
3.2.3	Raspberry Pi	- 77 -
3.3	Vytvorenie databázy.....	- 80 -
3.4	Návrh aplikácie	- 82 -
3.4.1	Aplikácia pre spracovanie dát z optickej hlavice	- 82 -
3.4.2	Aplikácia pre spracovanie dát z meteorologickej stanice.....	- 84 -
3.4.3	Bash scripty	- 86 -
3.5	Návrh webovej stránky.....	- 88 -
4	Vyhodnotenie vplyvu atmosférických javov na FSO spoj	- 93 -
4.1	Modely štruktúrneho parametru indexu lomu	- 93 -
4.2	Analýza meraného RSSI	- 97 -
4.3	Vplyv slnečného žiarenia na RSSI	- 98 -
4.4	Vplyv teploty vzduchu na RSSI	- 101 -
4.5	Vplyv ostatných veličín atmosféry	- 104 -
4.6	Vplyv zatmenia Slnka na RSSI	- 106 -
4.7	Predikcia RSSI vzhľadom na merané meteorologické veličiny	- 108 -
	Záver	- 111 -
	Použitá literatúra	- 113 -
	Zoznam príloh	- 115 -

Úvod

Rýchly pokrok v oblasti informačných a komunikačných technológií prekročil všetky očakávania pre splnenie požiadaviek multimediálnej spoločnosti 21. Storočia. Optický bezvláknový spoj, známi ako Free Space Optic (FSO) je v poslednej dobe stále častejšie využívaný pre komunikáciu v rôznych oblastiach. Využitie FSO našlo uplatnenie, pri komunikácii na malé i veľké vzdialenosti ako sú prenosy medzi budovami respektíve medzidružicové prenosy. Terestriálne FSO systémy využívajú niektoré výhody optických vlákien, ako je dosahovanie vysokých rýchlostí prenosu dát, bez vzájomného rušenia medzi jednotlivými FSO systémami, odolnosť voči odpočúvaniu prenášaných dát, jednoduchá inštalácia a relatívne nízke náklady. Použitie FSO môže mať kľúčovú výhodu a to hlavne v mestách ako lokálne siete LAN respektíve metropolitné siete MAN. Základ FSO hlavice tvoria zdroje a prijímače optického signálu. Vo FSO systémoch fotodetektor zohráva veľmi dôležitú úlohu pri efektívnej detekcii signálu. Na FSO detektory sa používajú PIN fotodiódy alebo lavínové fotodiódy APD.

Pri plánovaní nasadenia FSO musíme zväziť aj pre akú aplikáciu bude spoj určený. Či sa bude používať na prenos dát s nízkou rýchlosťou, či sa bude používať len cez noc poprípade celý deň, alebo pre vysokorýchlostný neprerušovaný prenos videa alebo dát.

FSO systémy by mali byť navrhnuté tak aby boli schopné pracovať za rôznych atmosférických podmienok ako sú hmla, opar, dážď, sneh, kolísanie indexu lomu, teploty okolia a podobne. Hmla, dážď, prach, sneh, dym a iné častice predovšetkým znižujú optický signál nesúci lúč. Molekulová absorpcia môže byť minimalizovaná vhodným výberom optickej vlnovej dĺžky. Dlhšie vlnové dĺžky prenosu (1550 nm) sú v porovnaní s kratšími dĺžkami (800 nm) použiteľnejšie v hmle, ale pri veľmi nízkej viditeľnosti (veľmi hustá hmla, opar) sú nepoužiteľné. Taktiež náhodné fluktuácie indexu lomu v atmosfére, ktoré sú spôsobené optickými turbulenciami majú za následok zvýšenie chybovosti BER, hlavne pri horizontálnych trasách cez dlhé úseky zemskej atmosféry. Straty signálu vyvolané optickými turbulenciami rastú so zvyšujúcou sa dĺžkou optického spoja. Riešením môže byť zosilnenie signálu, ale to nemusí znamenať zlepšenie kvality laserového lúča. Stála prítomnosť optickej turbulencie v atmosférickom kanále je limitujúci faktor na spoľahlivé fungovanie bezvláknovej optickej komunikácie.

V dnešnej dobe sa čoraz častejšie realizujú modely, ktoré sa používajú na predpoveď počasia poprípade iných veličín. Taktiež pred praktickým realizovaním FSO spoja sú často používané podobné modely. Tieto modely zisťujú ako sa bude správať napríklad výkon optického signálu za rôznych poveternostných podmienok v mieste kde má byť daný spoj realizovaný. Preto pred umiestnením optického spoja do prevádzky, sú umiestnené do danej oblasti snímače, ktoré zaznamenávajú hodnoty meteorologických veličín po dobu nejakého intervalu, ktoré sú používané k modelovaniu správania rôznych veličín. Týmto modelovaním sa predchádza možnosti, že bude FSO umiestnený do oblasti, ktorá je nevhodná pre tento spoj.

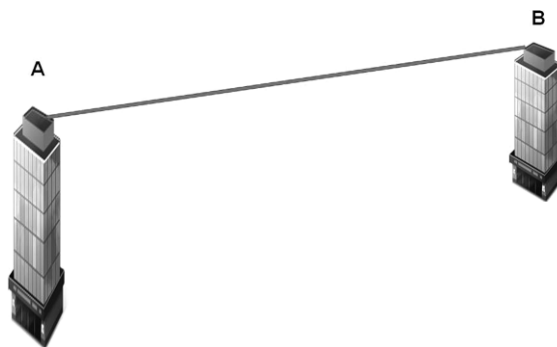
1 Optický bezvláknový spoj

V súčasnej dobe technológia optických vlákien úspešne splnila všetky očakávania, a predpokladá sa, že nejaký čas nebude nahradená inou technológiou.

Avšak niektoré aplikácie potrebujú okamžitú ultra vysokú rýchlosť služieb, alebo sú potrebné tam kde nie je dostatočná infraštruktúra optických vlákien. V tomto prípade je možné zabezpečiť komunikáciu pomocou FSO technológie.

FSO je vonkajšia bezdrôtová komunikačná technológia, ktorá sľubuje prenosové rýchlosti vyššie ako 1 Gbit.s^{-1} na jeden spoj, ak je súčasťou WDM systému celková šírka prenosového pásma na spoj môže byť až 120 Mbit.s^{-1} . Hoci sa môžu tieto rýchlosti prenosu zdať vysoké pre použitie v aplikáciách v obytných oblastiach môžu byť nedostatočné.

Technológia FSO používa laser modulovaného lúča ako vysielateľ, pre prijímače sa používajú citlivé fotodetektory. Hlavnou požiadavkou pre prevádzkovanie FSO systémov je priama viditeľnosť (LoS) medzi bodmi. V základnom prenosovom systéme typu bod-bod, ktorý je zobrazený na obrázku 1.1, je FSO vysielateľ umiestnený na obe strany prenosovej cesty, a teda je možné prevádzkovať plný duplex (obojsmerná komunikácia súčasne) na tomto spojení. Vo väčšine prípadoch je spoj realizovaný zo strechy jednej budovy na strechu druhej budovy.



Obrázok 1.1: FSO systém typu bod bod[1]

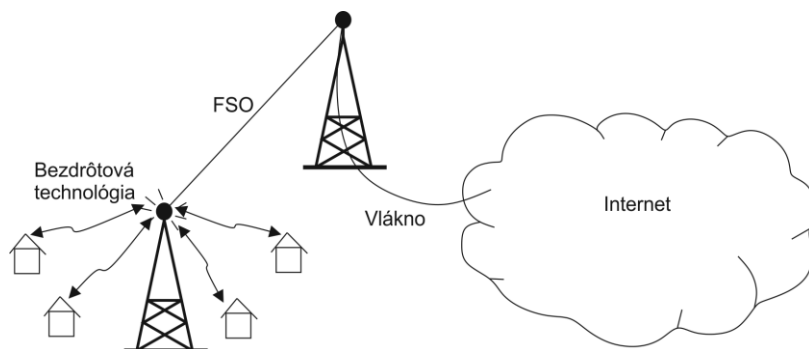
Federálna komisia pre komunikáciu (FCC) upravuje využívanie frekvencií pod 300 GHz. Preto na rozdiel od iných mikrovlnných systémov, FSO nevyžaduje licenciu na prevádzku. Čo umožňuje rýchle nasadenie a nastavenie FSO spojov za niekoľko dní za relatívne malé náklady v porovnaní nákladov na získanie práv, plánovanie a nasadenie vlákien.

V súčasnosti FSO spoje pre prenos dát používajú rýchlosti od niekoľkých Mbit.s^{-1} po 10 Gbit.s^{-1} na dĺžke spoja, ktorá sa pohybuje od niekoľko sto metrov až po niekoľko kilometrov. Prenos dát zabezpečuje typické protokoly ako Ethernet, SONET, SDH. Čo nám dovoľuje využívať FSO na pripojenie mobilnej stanice k sieti alebo ako prvý/posledný kilometer pripojenia k prístupovej sieti poprípade ako medzisatelitná komunikácia. Ďalšie využitie FSO je

vo vysokých polohách 20-30 km. Tieto zariadenia môžu komunikovať prostredníctvom FSO so zariadeniami v hĺbkovom vesmíre, pretože nad týmito zariadeniami už nie sú žiadne mraky.

Laserový lúč sa šíri atmosférou, vo väčšine prípadov v jej spodnej vrstve troposfére, ktorá nevytvára stabilné prenosové médium ako u vlákien. Preto si pri návrhu FSO spoja treba rozmyslieť účinnosť tohto spoja.

V porovnaní s bezdrôtovým spojom ktorý síce nepotrebuje priamu viditeľnosť a môže komunikovať s pohybujúcim sa objektom na veľké vzdialenosti, ale s malou rýchlosťou, dosahuje FSO veľké rýchlosti aj pri veľkej vzdialenosti. Preto čoraz častejšie dochádza ku kombinácii FSO spoja s bezdrôtovými spojmami. Topológia FSO v spojení s inou bezdrôtovou technológiou je zobrazená na obrázku 1.2. [1]

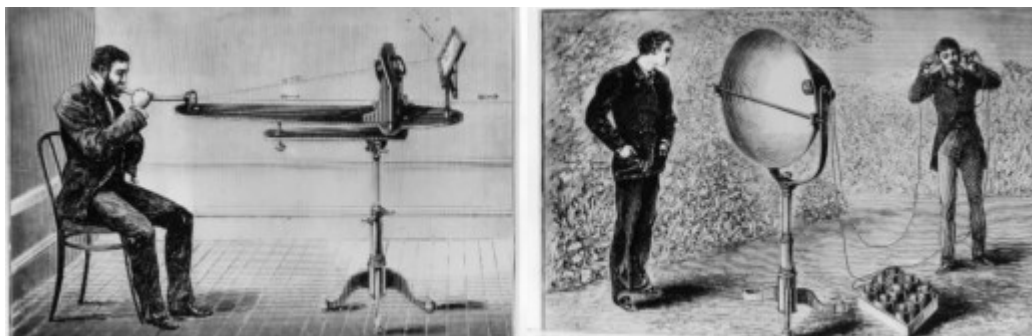


Obrázok 1.2: Kombinácia FSO s vláknovým a bezdrôtovým spojom[1]

1.1 Vývoj FSO technológie

Komunikácia pomocou svetla nie je nový vedný odbor. Staré rímske záznamy poukazujú, že vyleštené kovové platne boli príležitostne používané ako zrkadlá, ktoré odrážali slnečné svetlo na širokú oblasť signalizácie. Americká armáda používala podobné zariadenia poháňané slnečným žiarením pre odoslanie telegrafu z vrcholu hory na iný vrchol pred rokom 1800. Blikanie svetla pre odosielanie správ z jednej lode na druhú bolo používané už dávno predtým. [1]

Alexander Graham Bell uskutočnil experiment s jeho prístrojom, ktorý nazval fotofón. Tento prístroj je zobrazený na obrázku 1.3. Ako svetelný zdroj tohto prístroja bolo Slnko. Svetlo dopadalo na skupinu zrkadiel, kde sa niektoré zrkadlá využívali ako modulátory. Modulačné zrkadlo sa vychyľovalo pomocou ľudského hlasu a spôsobovalo zmeny optického výkonu svetla, ktoré dopadalo na selénový článok v prijímači. Zmeny detegovaného optického výkonu boli premenené na elektrický prúd a použitím slúchadiel späť na ľudský hlas. [3]



Obrázok 1.3: Bellov fotofón [3]

Potom ako sa v roku 1970 podarilo uskutočniť prenos dát pomocou optického bezvláknového spojenia sa problematikou FSO začalo zaoberať skupina organizácií a univerzít.

Ako prvá organizácia, ktorá sa začala zaoberať s problematikou FSO bola firma IBM. Tejto firme sa podarilo dosiahnuť prenos dát s rýchlosťou 64 kbit.s^{-1} . Ako modulácia bolo použité PSK s nosnou frekvenciou 256 kHz. Ako zdroj svetla bola použitá skupina 40 GaAs LED diód na vlnovej dĺžke 950 nm. Každá dióda vyžarovala optický výkon 16 mW. Na prijímač bolo použitých 9 fotodetektorov.

V roku 1983 bol skupinou z organizácie Fujitsu vytvorený plne duplexný systém s priamou viditeľnosťou. Systém umožňoval prenosovú rýchlosť $19,2 \text{ kbit.s}^{-1}$ na vzdialenosť 10 m a chybovosťou BER 10^{-1} . Vysielač tvorila skupina 9 LED diód, prijímač obsahoval 4 kremíkové PIN fotodiódy. Ako modulácia bolo použité FSK v kombinácii s intenzitnou moduláciou IM. O dva roky neskôr sa im podarilo zvýšiť prenosovú rýchlosť na 48 kbit.s^{-1} . Nová verzia bola v konfigurácii pre spojenie bod-multibod a hybridnú priamu viditeľnosť LoS, alebo pre spojenie bod-bod a nepriamu LoS. Bola použitá vlnová dĺžka svetla od 800 do 900nm.

V roku 1985 skupina vedcov zo spoločnosti Hitachi a HP Labs prezentovali návrh FSO spoja. Systém od spoločnosti Hitachi bol pre priamu LoS konfiguráciu a obsahoval optický reflektor. Tento systém dosahoval 1 Mbit.s^{-1} prenosovej rýchlosti s chybovosťou 10^{-7} na vzdialenosť 5 m. Ako zdroj svetla boli použité LED diódy s celkovým optickým výkonom 300 mW. Ako prijímač bola použitá skupina PIN fotodiód s Fresnelovými šošovkami. Modulácia bola použitá FSK.

HP Labs predložila systém, ktorého vysielač bol umiestnený na strop a prijímače boli rozmiestnené rôzne. Tento systém dosahoval rýchlosť 1 Mbit.s^{-1} na vzdialenosť 50 m s chybovosťou BER 10^{-9} .

V roku 1987 spoločnosť AT&T Bell predstavila svoj systém ktorý dosahoval prenosovú rýchlosť 450 Mbit.s^{-1} s vlnovou dĺžkou 800 nm.

V roku 1993 organizácia BT Labs zverejnila bunkový FSO systém, ktorý dosahoval rýchlosti 50 Mbit.s^{-1} . Vysielač bol zložený z laseru a počítačom generovaného hologramu, ktorý rozprestieral svetlo a redukoval optický výkon laseru. Laser dosahoval optický výkon 14 dBm a pracoval na vlnovej dĺžke 850 nm. Prijímač sa skladal z PIN fotodiód a optického filtra

z tenkých z tenkých filmov s pásmovou priepustnosťou $\Delta\lambda=50$ nm . Tento systém umožňoval pokrytie miestnosti s rozmermi $2,2 \times 2,2 \times 3$ m. O rok neskôr sa podarilo zvýšiť prenosovú rýchlosť na 155 Mbit.s^{-1} , výkon vysielača na 40 mW. V tomto systéme prijímač obsahoval lavínové fotodetektory.

Výskumom FSO systémov sa zaoberali taktiež univerzity. Vedci z Univerzity of Berkeley predstavili v rokoch 1994 a 1996 difúzny FSO systém s prenosovou rýchlosťou 50 Mbit.s^{-1} a moduláciou OOK so spätnou rozhodovacou ekvalizáciou. Optický vysielač pracoval tak, že so svetlom o vlnovej dĺžke 806 nm osvetľoval biely strop a steny miestnosti, čím sa vytvorila difúzna sieť. Optický výkon vysielača bol 475 nW. Prijímač obsahoval PIN fotodiódy.

Ďalšia univerzita, ktorá sa zaoberala výskumom FSO systémom bola Oxfordská univerzita. Tento systém obsahoval vysielač umiestnený na strope miestnosti, ktorý komunikoval s terminálom. Tento systém dosahoval prenosovú rýchlosť 155 Mbit.s^{-1} a pracoval na vlnovej dĺžke 980 nm s linkovým kódom Manchester.

Neskôr spoločnosť Showa Electric predstavila systém s prenosovou rýchlosťou 100 Mbit.s^{-1} a maximálnou vzdialenosťou 20 m. Vysielač obsahoval LED diódy, prijímač lavínové fotodetektory.

Ďalší systém bol predstavený v roku 2004 s prenosovou rýchlosťou 100 Mbit.s^{-1} a moduláciou DPPM. Vysielač obsahoval pole plošne vyžarujúcich VCSEL laserov a difrakčný prvok. Lasery pracovali na vlnovej dĺžke $1,4 \mu\text{m}$. Prijímač obsahoval pole InGaAs detektory s úzkym FOV. [3]

1.2 Vlnová dĺžka vo FSO

V súčasnosti FSO systémy dokážu nadviazať obojsmernú komunikáciu cez jeden spoj. V závislosti na vlnovej dĺžke ktorú FSO systémy používajú, ich môžeme zaradiť do dvoch kategórii FSO,

- ktoré používajú vlnovú dĺžku v pásme 800 až 900 nm,
- ktoré pracujú na 1310 alebo 1550 nm.

V prvej kategórii je využívaná VCSEL laserová technológia, ktorá má nízky výkon a preto je vhodná pre nízke rýchlosti (Mbit.s^{-1}). V druhej kategórii je používaná vylepšená VCSEL technológia a lasery s distribuovanou spätnou väzbou (DBF lasery), ktoré emitujú vyšší optický výkon (typicky - 8 dBm). FSO používajú štandardné telekomunikačné lasery s nízkym výkonom, a tak sa nevyskytuje bezpečnostný problém, ktorý je pri laseroch s vysokým výkonom. Na prijímači sa typicky používa lavínová fotodióda (APD) s citlivosťou až - 40 dBm. Z vláknovej komunikácie je dobré známe že citlivosť detektora APD závisí na vlnovej dĺžke dopadajúceho lúča a taktiež na rýchlosti (napríklad vlnová dĺžka 1550 nm, citlivosť APD pri rýchlosti $2,5 \text{ Gbit.s}^{-1}$ je - 29 dBm, pri 155 Mbit.s^{-1} -43 dBm).

S ohľadom na rušenie slnečného žiarenia na pozadí (SBR) vo FSO komunikácii je potrebné zdôrazniť, že vážny problém nastáva, keď je vysielač FSO umiestnený priamo

na východ alebo západ, a kde pri východe respektíve západe Slnka môže SBR byť okolo 6000 K.

V najjednoduchšej konfigurácii je laser, ktorý vytvára tenký lúč svetla s vlnovou dĺžkou 1300 až 1600 nm, ktorý je modulovaný na rýchlosť 1 Gbit.s⁻¹. Tento lúč je zameraný na prijímač (fotodetektor), ktorý je vzdialený niekoľko sto metrov až 2 kilometre. Keď lúč dorazí na fotodetektor sú sledované 2 hlavné body.

Za prvé, priemer lúča v mieste prijímača je oveľa väčší než je priemer lúča v mieste vysielača, čo je spôsobené priestorovou divergenciou lúča. Konkrétne pôvodný tenký lúč, menší než 1 mm, bude mať viac ako 1 meter.

Za druhé, fotodetektor má sám o sebe malú plochu (niekoľko milimetrov štvorcových) v porovnaní s niekoľkými metrami štvorcovými priemeru prierezu lúča na prijímacej strane. To znamená, že množstvo energie, ktorá má vplyv na fotodetektor je zlomok prichádzajúcej, a preto fotodetektor nemusí byť dostatočne citlivý aby reagoval na malé množstvo prichádzajúcich fotónov. Výsledkom je, že môže byť použitý širší otvoru ďalekohľadu pre príjem viacerých fotónov na fotodetektor.

FSO laserový lúč s vlnovou dĺžkou nad 1400 nm je absorbovaný šošovkou a rohovkou ľudského oka, a preto nie je nebezpečný pre poškodenie sietnice. V dôsledku toho lasery, ktoré vyžarujú svetlo nad 1400 nm môžu byť až 50krát silnejšie ako lasery pod túto hodnotu vlnovej dĺžky. Preto lasery s vlnovou dĺžkou 1550 nm môžu byť 50krát silnejšie ako lasery s vlnovou dĺžkou 800 nm, a pri tom vykazujú rovnakú bezpečnosť pre oči. Okrem toho vlnová dĺžka 1550 nm preniká sklenenými panelmi efektívnejšie, čo je vhodné pri použití spojenia okno - okno, alebo okno - strecha, ak existuje priama viditeľnosť.[1]

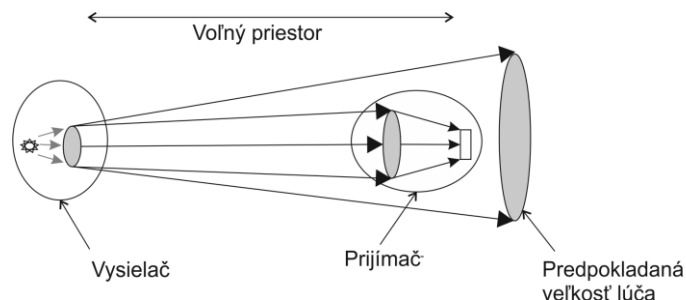
1.3 Princíp FSO

Optická časť vysielača zahŕňa zdroj svetla a skupinu ďalekohľadov. Ďalekohľad môže byť navrhnutý pomocou šošovky, alebo môže byť použité parabolické zrkadlo. Ďalekohľad upravuje svetlo na tenký lúč a smeruje k prijímaču.

Prichádzajúce svetlo je zachytené na strane prijímača pomocou objektívu alebo zrkadla. Následne je prijaté svetlo zaoštrované na fotodetektor. Pre praktické účely sa predpokladá, že veľkosť lúča na prijímacej strane je oveľa väčšia ako veľkosť prijímacej optiky. Čo spôsobuje, že časť prenášaného svetla sa stráca počas procesu prenosu. Tento jav je známi ako geometrické straty na trase. Použitím užšieho lúča sa znižuje množstvo týchto strát, avšak úzky lúč vyžaduje stabilnú montážnu plošinu alebo aktívny sledovací systém lúča.

V digitálnej prenosovej sústave je vysielač modulovaný vstupným elektrickým signálom, ktorý nesie informáciu. Čo je podobné ako pri prenose cez optické vlákna. Počas konverzie elektrického signálu na optický je informácia prevedená z elektrickej domény do optickej. Tento proces prevodu nám umožňuje udržiavanie prenosového spojenia nezávisle na použitom protokole. FSO prenosový systém môže pracovať ako fyzická vrstva jedného

spojenia v sieti. Na strane prijímača, ďalekohľad zachytí modulovaný svetelný tok a prijímač prevedie optický signál späť na elektrický signál. [2]



Obrázok 1.4: Schéma FSO prenosového systému [2]

1.4 Optické zdroje vo FSO

V moderných FSO systémoch sa používajú rôzne zdroje svetla na prenos optického signálu. V súčasnej dobe sú hlavne používané polovodičové lasery, preto sa v tejto kapitole zameriavame na polovodičové zdroje žiarenia. Hlavné rozdiely medzi týmito zdrojmi svetla sú:

- vlnová dĺžka,
- výkon,
- modulačná rýchlosť,
- cena.

Použitie konkrétneho optického zdroja je dané cieľovou aplikáciou.

1.4.1 LED

LED sú polovodičové štruktúry emitujúce svetlo. Vzhľadom na ich relatívne nízky vysielač výkon sa LED obvykle používajú v aplikáciách na kratšie vzdialenosti s menšími požiadavkami na šírku pásma (do 155 Mb/s). V závislosti na použitom materiáli, môžu LED pracovať na rôznych vlnových dĺžkach. V porovnaní s úzkopásmovým zdrojom žiarenia majú LED oveľa širší spektrálny rozsah prevádzky. Typicky sa šírka emisného spektra FWHM pohybuje medzi 20 a 100 nm okolo centrálnej vlnovej dĺžke. Infračervené LED sa používajú ako zdroj žiarenia prenosu na diaľkové ovládanie domácnosti.

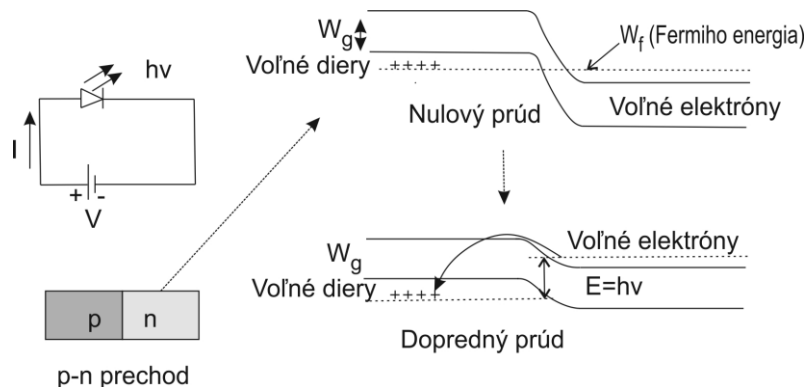
Výhody LED sú:

- nízke náklady,
- mimoriadne dlhá životnosť. [2]

1.4.1.1 Princíp a charakteristika LED

LED je polovodičová štruktúra s PN prechodom. PN prechod je komponenta, ktorá vyžaruje svetlo pri použití prúdu. Obrázok 1.5 zobrazuje elektrický obvod, PN prechod a príslušné energetické pásmo štruktúry. Pre popis fungovania LED technológie môže byť použitý energetický skupinový model.

Energetický model zobrazuje dve povolené energetické hladiny. Zakázaná oblasť sa často označuje ako zakázaný pás W_g a oddeľuje tieto hladiny. V hornej hladine energie sú elektróny, ktoré nie sú viazané na atóm, a ktoré sa môžu voľne pohybovať. V spodnej hladine energie, ktorá sa nazýva valenčná hladina sú neviazané diery, ktoré sa voľne pohybujú. Tieto diery existujú v miestach kde elektróny zanechali neutrálny atóm, v dôsledku toho diery opúšťa čistý kladný náboj. Pri rekombinácii elektrónu s dierou sa uvoľní energia a atóm sa vráti do základného stavu. Vzhľadom k tomu polovodič typu N má ďalší prísun voľných elektrónov a materiál typu P má množstvo voľných dier. [2]



Obrázok 1.5: Model zakázaného pásu LED [2]

Keď je materiál typu N a typu P združený, elektróny a diery rekombinujú v oblasti rozhrania. Avšak, počas tohto procesu je generovaná bariéra (neutrálna oblasť) a ani elektróny ani diery nemajú dostatok energie k prekročení tejto bariéry. S nulovým prúdom aplikovaným na konštrukciu sa pohyb náboja zastaví a žiadne rekombinácie neprebiehajú. Ale ak je aplikovaný prúd, bariéra sa znižuje a potenciálna energia voľných elektrónov v materiálu typu N sa zvyšuje. Inými slovami môžeme povedať, že energia materiálu typu N sa dostane na vyššiu energetickú úroveň, ako je vidieť na obrázku 1.6. Prúd poskytuje elektrónom a dieram dostatočnú energiu k pohybu do oblasti bariéry. Keď elektrón stretne dieru, padá na valenčnú vrstvu a rekombinuje s dierou. Počas tohto procesu je uvoľňovaná energia vo forme fotónu. Vlnová dĺžka svetla emitujúceho počas tohto procesu závisí na energii zakázaného pásma W_g , čo je ukázané v nasledujúcej rovnici:

$$\lambda = \frac{h \times c}{W_g}. \quad (1.1)$$

Pre FSO aplikácie sú významné materiály arzenid gália (GaAs) a hliník arzenidu gália (AlGaAs), pretože emisné vlnové dĺžky spadajú do nižšej vlnovej dĺžky atmosférického okna (okolo 850 nm). V rozsahu vlnových dĺžok okolo 850 nm je typická spektrálna šírka LED od 20 do 50 nm.

Modulačná šírka pásma LED je spojená s životnosťou náboja τ , kde τ je definovaná ako priemerný čas pre rekombináciu náboja. Elektrická modulačná rýchlosť musí byť menšia ako životnosť náboja. Elektrická (3dB) šírka pásma je potom definovaná ako:

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi\tau}. \quad (1.2)$$

LED diódy typický pracujú s modulačnou šírkou pásma medzi 1 MHz a 100 MHz. LED diódy, ktoré môžu byť použité v aplikáciách a požadujú väčšiu šírku pásma nie sú schopné emitovať vysoký optický výkon.

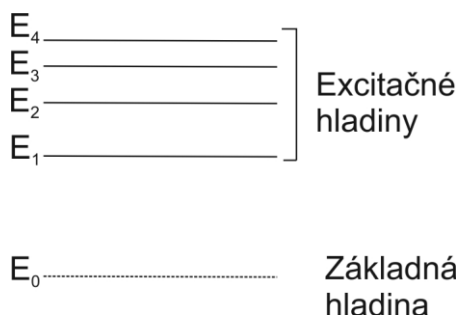
Časom sa pre určitú hodnotou prúdu svetelný výkon LED znižuje. Životnosť LED diód (doba keď výkon poklesne na polovicu pôvodnej hodnoty) môže byť väčšia ako 10^5 hodín, čo odpovedá približne 11 rokov. Niektoré diódy tolerujú teploty od -65 až $+125^\circ\text{C}$, avšak výstupný výkon sa znižuje z rastúcou teplotou. [2]

1.4.2 Lasery

Laser alebo tiež môžeme povedať zosilňovač svetla stimulovanou emisiou. Myšlienku stimulovanej emisie popísal Albert Einstein v roku 1916. Do tej doby, fyzici verili že fotón mohol mať interakciu s atómom iba 2 spôsobmi: fotón mohol absorbovať a podať atóm na vyššiu energetickú hladinu, alebo bude fotón emitovaný z atómu keď klesne na nižšiu energetickú hladinu.

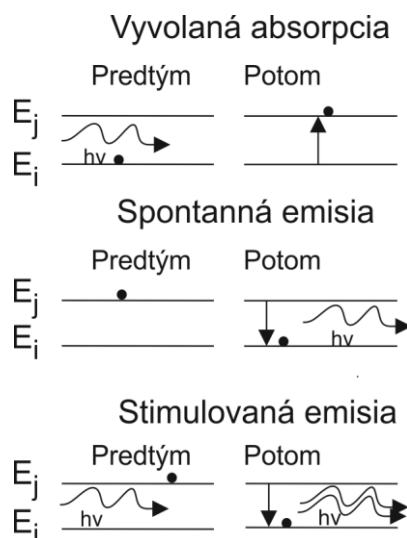
Prvú evidovanú stimulovanú emisiu sa podarilo zaznamenať v roku 1928. Ďalšie dve desaťročia boli potrebné aby stimulovaná emisia bola viac než sofistikovaný laboratórny experiment. Prvá demonštrácia ruby laseru bola v roku 1960 od IBM. V roku 1961 bola v Bell Labs demonštrácia hélum-neónovho laseru. Prvý polovodičový laser bol predstavený simultánne v roku 1962 3 skupinami: General Electric, IBM a MIT. Od tej doby sa prevádzkové charakteristiky a výkon laserov neustále zdokonaľuje, avšak základný koncept stimulovanej emisie ostáva rovnaký.

Obrázok 1.6 ukazuje typický energetický diagram atómu. Elektrón môže byť posunutý na vyššiu energetickú hladinu pôsobením vonkajšej energie. Základné pravidlo je, že nie všetky prechody sú povolené a doba po ktorú elektrón ostane na vyššej hladine až pokiaľ spadne na nižšiu energetickú hladinu sa mení. Keď elektrón prejde z vyššej na nižšiu hladinu je uvoľnená energia. Na žiarivý prechod ktorý zahŕňa emisiu fotónu vo viditeľnom, alebo infračervenom spektre je potrebné dostatočné množstvo rozdielu energie medzi oboma energetickými hladinami.[2]



Obrázok 1.6: Diagram energetických hladín[2]

Pre ľahšie pochopenie, je popísaný princíp laserov pomocou 2 energetických hladín. Na obrázku 1.7 sú zobrazené rôzne stavy fotónu.



Obrázok 1.7: Laserové operácie[2]

Pri excitácii atómu fotónom môžu nastať 3 možnosti:

- indukovaná absorpcia: prichádzajúci fotón, ktorého vlnová dĺžka odpovedá rozdielu medzi energetickými hladinami E_j a E_i môže byť absorbovaný atómom, ktorý je v spodnej energetickej hladine. Po tomto procese fotón zanikne, ale jeho energie bola použitá pre prechod atómu na vyššiu hladinu energie.
- spontánna emisia: atóm na vyššej energetickej hladine môže samovoľne spadnúť na nižšiu energetickú hladinu. Energia ktorá bola uvoľnená pri tomto prechode sa javí ako emitovaný fotón. Vlnová dĺžka tohto fotónu odpovedá rozdielu energii medzi energetickými hladinami E_j a E_i .
- stimulovaná emisia: atóm na vyššej energetickej hladine môže spadnúť na nižšiu hladinu, pričom emitovaný fotón je s vlnovou dĺžkou odpovedajúcou rozdielu energie prechodu. Aktuálna emisia je indukovaná prichádzajúcim fotónom s vlnovou dĺžkou zhodujúcou sa s energiou prechodu hladín atómu. Stimulovaný fotón bude emitovaný vo fáze s počiatočným fotónom, ktorý pokračuje v šírení.

Keď tieto tri procesy prebiehajú v médiu akým je polovodičový materiál je použité veľké množstvo atómov. Ak je viac atómov v základom stave (alebo v nižšej hladine) oproti vyššej hladine bude počet fotónov vstupujúcich do materiálu znížený zapríčinený absorpciou. Avšak, ak je počet fotónov na vyššej hladine menší ako počet fotónov na nižšej hladine je vytvorený stav, ktorý sa nazýva inverzia populácie. Činnosť laseru požaduje stav inverzie populácie, pretože za týchto okolností sa zvyšuje počet fotónov ako sa šíria médiom v dôsledku,

že viac fotónov narazí na atómy vyššej hladiny ako na atómy nižšej hladiny. Atómy na vyššej energetickej hladine generuje ďalšie fotóny, zatiaľ čo atómy na nižšej energetickej hladine absorbujú fotóny. Médium s inverziou populácie má zisk a vlastnosti zosilňovača.

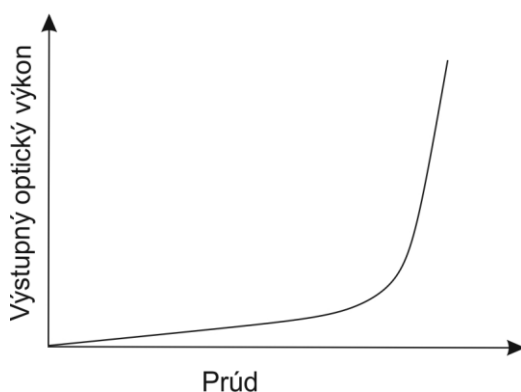
Laser je vysoko-frekvenčný generátor, alebo oscilátor. K tomu aby systém osciloval potrebuje zosilnenie, spätnú väzbu a ladiaci mechanizmus, ktorý určuje frekvenciu oscilovania. V rádiový frekvenčnom systéme, môže byť spätná väzba poskytovaná filtrovaním výstupného signálu frekvenčným filtrom, pripojením výstupného signálu na vstup a elektronický zosilňovaný, predtým ako je signál pripojený späť na vstup. V prípade laseru, médium poskytuje zosilnenie. Preto médium schopné laserovej činnosti je často označované ako aktívne médium.

Médium poskytuje zosilnenie svojimi charakteristickými energetickými hladinami a prechodmi medzi hladinami. V každej dobe médium zaručuje vlastnú frekvenciu. V laserovom systéme, zrkadla poskytujú mechanizmus spätnej väzby. Tieto zrkadlá tvoria laserovú dutinu. Fotóny sa odrazia od zrkadiel a pokračujú médium pre ďalšie zosilnenie. Aspoň jedno zo zrkadiel prepúšťa prenášané svetlo mimo dutinu. Avšak, väčšina svetla je odrazená späť k dosiahnutiu stavu inverzie populácie vo vnútri dutiny.

Laser osciluje, keď zisk presahuje všetky straty v laserovom systéme. Tie straty sú typicky absorpcia, rozptyl a strata laserového výkonu na zrkadlách.

Podobne ako LED, lasery sú elektrické čerpace zdroje. Ak je napätie malé, zisk je menší ako straty a výstupný výkon je nulový. Keď sa napätie mierne zvýši nastane malé množstvo stimulovanej emisie. Avšak, výkon bude malý, výstup nekoherentný a spektrálna šírka bude veľká. V tejto situácii je činnosť laseru podobná ako u LED.

Keď sa výkon zvýši, viac atómov prejde na vyššiu hladinu a interný zisk narastie. V určitom prahovom napätí sa bude zisk rovnat stratám a spustí sa oscilácia. Ďalšie zvyšovanie napätia výrazne zvýši výstupný výkon, emitované svetlo bude koherentné a spektrálna šírka veľmi úzka.



Obrázok 1.8: Vzťah medzi vstupným prúdom a výstupným výkonom pre polovodičový laser[2]

Obrázok 1.8 ukazuje vzťah medzi vstupným prúdom a výstupným výkonom pre polovodičovú laserovú diódu. Pred dosiahnutím prahovej hodnoty laseru je výstupný výkon malý, čo je podobné ako u LED. Keď sa presiahne prahová hodnota, malá zmena vstupného prúdu spôsobí výrazné zvýšenie výstupného výkonu.[2]

1.4.3 Kritéria laserov pre FSO systémy

Výber vhodného laserového zdroja pre FSO aplikácie závisí od veľa faktorov. Je dôležité aby operačná vlnová dĺžka laseru odpovedala jednému z atmosférických okien. Vhodné atmosférické okná sú 850 a 1550 nm v blízkej IR oblasti vlnových dĺžok. V ďalekej IR oblasti sú okná prezentované medzi 3-5 a 8-14 mikrometrami. Avšak v dnešnej dobe sú vhodné dostupné svetelné zdroje v tých dlhých vlnových oblastiach limitované. Okrem toho, väčšina zdrojov potrebujú nízke teploty chladenia, čo obmedzuje ich použitie v komerčných aplikáciách. Ďalšie faktory ktoré obmedzujú použitie špecifických svetelných zdrojov sú:

- cena a dostupnosti komponentov,
- výkon, životnosť,
- schopnosť modulácie,
- dostatočná ochrana očí,
- kompatibilita s inými prenosovým médium,
- stabilita laseru, šum laseru. [2]

1.5 Prijímače vo FSO

Okrem svetelných zdrojov, sú taktiež prijímače svetla dôležitým prvkom v návrhu FSO systému. Prijímač svetla deteguje svetlo použitím rozdielných fyzikálnych javov. Podobne ako laserové zdroje veľa detektorov používaných vo FSO sú polovodičové prvky. Tieto prvky sú závislé na špecifickom materiáli, ktorý môže pracovať v rôznych oblastiach vlnových dĺžok.

V moderných vysokorýchlostných aplikáciách sú použité 2 dôležité fyzikálne mechanizmy pre detekciu svetelných signálov:

- vonkajší,
- vnútorný fotoelektrický efekt.

Oba tieto efekty spôsobujú premenu prichádzajúcej energie fotónov na elektrickú podobu. Vákuové diódy alebo foto-zosilňovače sú založené na vonkajšom fotoelektrickom efekte, zatiaľ čo polovodičové detektory ako PIN alebo lavínová APD dióda používajú vnútorný fotoelektrický efekt na detegovanie fotónov. Dôležité faktory ako citlivosť, spektrálna odozva, doba nábehu sú popísané nižšie. Tieto faktory sa používajú k porovnávaniu detektorov. [2]

Citlivosť detektora ρ je definovaná vzťahom medzi výstupným prúdom fotodetektora a vstupným optickým výkonom:

$$\rho = \frac{1}{P} [A/W] \quad (1.3)$$

Spektrálna odozva sa vzťahuje k oblasti vlnovej dĺžky, na ktorú je daný detektor citlivý. To poskytuje údaj vzťahujúci sa k množstvu prúdu produkovaného na špecifickej vlnovej dĺžke, za predpokladu, že všetky vlnové dĺžky poskytujú rovnaký svetelný výkon.

Doba nábehu je čas potrebný pre detektor na zvýšenie jeho výstupného prúdu 10% na 90% z celkovej hodnoty, keď svetelný pulz dopadá na povrch detektora. Modulačná šírka pásma (3 dB) detektora je daná dobou nábehu t_τ :

$$f_{-3dB} = \frac{0,35}{t_\tau}. \quad (1.4)$$

Pre vnútorný fotoelektrický proces je definovaná kvantová účinnosť η , ktorá je daná ako podiel množstva generovaných elektrónov ku celkovému počtu fotónov:

$$\eta = \frac{\text{počet výstupných elektrónov}}{\text{počet vstupných fotónov}}. \quad (1.5)$$

Citlivosť detektora ρ a kvantová účinnosť η sú spojené cez nasledujúci vzťah:

$$\rho = \frac{e \times \eta}{h \times \nu}, \quad (1.6)$$

kde e je náboj elektrónu, h je Plancková konštanta a ν je frekvencia svetla.

Z pohľadu fotoprúdu sa predchádzajúca rovnica môže prepísať ako:

$$i = \frac{\eta \times e \times \lambda}{h \times c}, \quad (1.7)$$

v ktorom λ je vlnová dĺžka fotónu, c je rýchlosť svetla vo vákuu. [2]

1.5.1 Polovodičová fotodióda

Polovodičové fotodiódy sú malé, rýchle, citlivé a poskytujú veľa rozdielných oblastí vlnových dĺžok, ktoré sú používané vo FSO systémoch. Jednoduchá forma polovodičovej diódy je PN dióda. Základný detekčný mechanizmus detektora je jednoduchý. Ako je ukázané na obrázku 1.5, potenciálna energetická bariéra medzi oblasťou P a oblasťou N polovodičového materiálu je zvýšená, keď je aplikované spätné zosilnenie napätia. Voľné elektróny v oblasti N a voľné diery v oblasti P nemajú dostatočnú energiu pre prekonanie potenciálnej bariéry, preto nemôžeme sledovať žiaden prúd vo vonkajšej oblasti ktorá spája oba materiály. Oblasť bariéry sa nazýva prechod. Vzhľadom na neexistujúce nosiče v prechode je tento prechod označený za vyčerpaný. Väčšina z úbytku napätia môže byť zmeraná na prechode, kde je elektrické pole cez P a N vrstvy relatívne slabé.

Keď fotón vstupuje do štruktúry cez P oblasť je na PN prechode absorbovaný, a tak môže dôjsť ku zvýšeniu energie elektrónu cez bariéru a následný presun elektrónu z valenčného do vodivostného pásma. Inými slovami, fotón vytvorí voľný elektrón alebo pár elektrón-diera. Pohybom elektrického poľa sa diery a elektrón začínajú pohybovať opačnými smermi

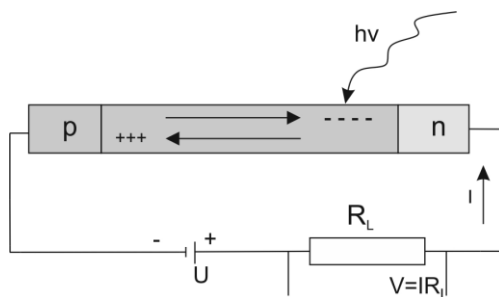
cez príslušné oblasti P a N. Tento pohyb nábojov spôsobujú prúd vo vonkajšom obvode. Môže byť meraný ako pokles napätia na odpore vo vonkajšom obvode.

Ak je fotón absorbovaný vo vnútri P alebo N oblasti, vytvára pár elektrón-diera, ale v dôsledku malého elektrického poľa v tejto oblasti je pohyb nosičov náboja pomalý, difúzny a veľké množstvo ich rekombinuje pred dosiahnutím PN prechodu. Toto je hlavná príčina prečo sú PN detektory neefektívne. Táto difúzia nosičov je príčina, prečo majú tieto PN detektory relatívne krátku dobu odozvy. Typicky doba odozvy PN detektoru je v mikrosekundách, čo je nepoužiteľné pre vysokorýchlostné detekcie svetla. [2]

1.5.2 PIN dióda

PIN diódy riešia problém s malou citlivosťou a pomalou dobou nábehu v polovodičových štruktúrach. Tie sú najčastejšie používané ako polovodičové detektory vo FSO aplikáciách.

Ako je zobrazené na obrázku 1.9, PIN dióda má širokú vnútornú polovodičovú vrstvu oddelenú od P a N oblastí. Vnútorná vrstva nemá voľné náboje, takže jej odpor je vysoký. Preto sa väčšina z poklesu vonkajšieho napätia objaví cez vnútornú vrstvu a elektrické pole vo vnútri vrstvy je vysoké.



Obrázok 1.9: Štruktúra PIN diódy[2]

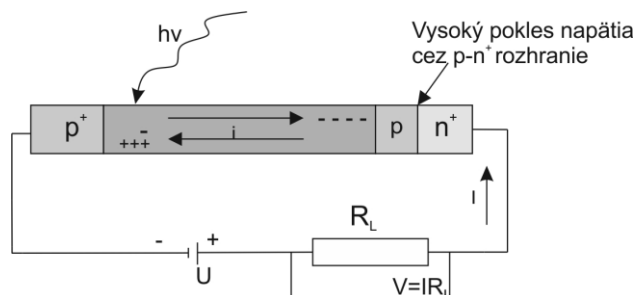
V dôsledku širokej vnútornej vrstvy bude väčšina fotónov absorbovaných v tejto oblasti skôr ako v P a N oblasti na vonkajšej štruktúre. Toto výrazne zvyšuje citlivosť a dobu nábehu PIN diód v porovnaní s PN diódami. Na vytvorenie páru elektrón-diera vo vnútornej vrstve potrebuje fotón minimálnu energiu aby elektrón prekročil zakázaný pás. Pretože energia fotónu je daná jeho vlnovou dĺžkou, medzná vlnová dĺžka λ_c pre špecifický materiál detektoru daná ako:

$$\lambda_c = \frac{1,24}{W_g}, \quad (1.8)$$

s vlnovou dĺžkou λ danú v μm a so zakázaným pásmom W_g v eV. [2]

1.5.3 Lavínová fotodióda APD

Lavínová fotodióda, alebo tiež APD, je polovodičový detektor, ktorý má vnútorný zisk. Toto zvyšuje citlivosť v porovnaní s PN alebo PIN detektormi. Keď porovnáваме s použitím vonkajšieho zosilňovacieho stupňa ako je napríklad externý tranzistorový obvod, vnútorný zisk zlepšuje odstup signálu od šumu SNR. Obrázok 1.10 zobrazuje vnútornú štruktúru APD.



Obrázok 1.10: Štruktúra APD [2]

Fotón absorbovaný vo vyčerpanej oblasti π generuje pár elektrón-diera. Podobne ako u PIN štruktúry, táto vyčerpaná oblasť je vnútorná oblasť, ktorá obsahuje malé množstvo voľných nosičov náboja, preto je vysoko odolná. Vzhľadom k tomu, pokles napätia vo vyčerpanej oblasti je vysoký, vytvorené nosiče náboja prichádzajúcim fotónom sú urýchľované elektrickým poľom a získavajú kinetickú energiu. V prípade ak je kinetická energia získaná počas tohto procesu dostatočne veľká na vytvorenie ďalšieho páru elektrón-diera v priebehu zrážky s iným atómom bude vytvorený ďalší pár elektrón-diera.

Tento proces môže prebiehať opakovane, a to v dôsledku násobenia nosičov prostredníctvom lavínového efektu. Aby bol proces efektívny musí byť aplikované veľké reverzné napätie na štruktúru diódy. V niektorých prípadoch toto napätie môže dosahovať niekoľko stoviek Voltov.

V štruktúre diódy, oblasti označené N^+ a P^+ sú silne dotované s nosičmi náboja. Vzhľadom k vysokému množstvu nosičov náboja v týchto oblasti je ich odolnosť malá, dôsledkom malého úbytku napätia. Ako už bolo spomenuté oblasť π je len málo dotovaná (blízko vnútornej oblasti) a má pomerne vysokú odolnosť. Dôsledkom toho vyčerpaná oblasť na PN prechode presahuje do oblasti π . Pokles napätia je väčšinou cez PN prechod, kde výsledné veľké elektrické pole spôsobuje násobenie nosičov, keď elektrón generovaný v oblasti π vstupuje do tejto oblasti. Diery, ktoré sú generované v rovnakom čase v oblasti π sú unášané k opačnej oblasti P^+ . Avšak nedosahujú dostatočnú kinetickú energiu na vytvorenie párov elektrón-diera. Preto sa nepoužívajú pri násobiacom procese, čo je výhodné, pretože štruktúry, ktoré používajú len jeden typ nosiča (elektróny alebo diery) v násobiacom procese majú výborné šumové vlastnosti.

Zisk lavínovej fotodiódy sa zvyšuje s rastúcim napätím podľa nasledujúceho vzorca:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_d}{V_{BR}} \right)^n}, \quad (1.9)$$

v ktorom V_{BR} je reverzné prierné napätie diódy, V_d je vyhradené predpätie, a n je empirický faktor, ktorý je väčší ako 1. Prierné napätie závisí na špecifickej štruktúre diódy a môže sa pohybovať medzi 20 a 500 V.

Citlivosť ρ pre APD diódu môžeme zapísať ako:

$$\rho = \frac{Me \times \lambda \times \eta}{h \times c}, \quad (1.10)$$

kde η je kvantová účinnosť s rovnakým ziskom, typická lavínová citlivosť je od 20-80 A/W. Čo je vyššia citlivosť v porovnaní s kremíkovou PIN diódou, ktorej citlivosť je medzi 0,5-0,7 A/W.

Citlivosť ρ môžeme prepísať podľa fotoprúdu na:

$$i = \frac{Me \times \lambda \times \eta \times P}{h \times c}, \quad (1.11)$$

kde P je vstupný optický výkon. [2]

1.5.4 Kritéria prijímačov pre FSO systémy

Podobne ako u svetelných zdrojov výber špecifického typu detektora alebo materiálu detektora závisí na použitej aplikácii. Charakteristická citlivosť musí odpovedať vlnovej dĺžke vysielača.

Pre aplikácie s kratšími vlnovými dĺžkami v 850 nm okne dĺžok sú kremíkové detektory najlepšia voľba. PIN detektory sú dostatočné pre aplikácie na kratšiu vzdialenosť kde vysielač môže poskytnúť dostatočný výkon. APD diódy sú vhodnejšie pre aplikácie na dlhšie vzdialenosti. Vyššia citlivosť APD poskytuje väčšie rozpätie spoja. Avšak, APD diódy požadujú stabilne vysoké napätie a sú drahšie v porovnaní s PIN diódami. Typický temný prúd APD diódy je väčší ako u PIN diód.

Systém z kremíkoveho materiálu má strmú medznú vlnovú dĺžku na 1,1 μm . Preto nemôže byť kremík použitý v aplikáciách na väčšiu vzdialenosť. Pre rozsah 1550 nm je vhodný materiál InGaAs. Citlivosť systému tohto materiálu môže byť väčšia ako 0,9 A/W pre 1550 nm. InGaAs PIN diódy sú komerčne široko dostupné. Majú výborné modulačné vlastnosti a môžu pracovať s vysokými rýchlosťami (10 Gbit.s⁻¹ a viac).

Germánium má širokú spektrálnu odozvu a môže pracovať v kratších a dlhších oknách vlnových dĺžok. Avšak, germánium má veľmi veľký temný prúd, preto nie sú často používané vo FSO systémoch.

Pre potenciálne aplikácie v rozsahu vlnových dĺžok 3-5 μm a 8-14 μm sú viac exotické materiály ako MCT (Mercury cadmium telluride) s spektrálnou odozvou použiteľnou v týchto

rozsahoch. Ale podobné ako zdroje prenosu, musia byť tieto materiály chladené na nízke teploty.

Spojenie optického systému s prijímačom je taktiež dôležité. Väčší otvor prijímacieho objektívu zhromažďuje viac fotónov, ktoré sú zamerané do fotodetektora, čo dobre znižuje chyby z spriemerovania vplyvom atmosférických turbulencií ako výsledok solárneho ohrevu, kolísanie teploty, a tým aj časová, priestorová zmena indexu lomu vo vzduchu na prenosovej ceste lúča. Čo je známe pod pojmom scintilácia. Scintilácia je podobný jav ako viditeľný odraz vzdialených svetiel, ktorý sa pri použití FSO prejavuje chybovými sekvenciami čo je spôsobené kolísaním výkonu signálu v prijímači a tým sa ovplyvňuje aj dynamický odstup signálu od šumu (SNR), ktorý zvyšuje bitovú chybovosť BER. [2]

Veľký prierez objektívu prijímača zhromažďuje viac fotónov na väčšej ploche lúča a to umožňuje dynamický rozsah výkonu signálu. Niektorí výrobcovia FSO vysieláčov spájajú viac laserov a tým sa snažia vytvoriť viac paralelných lúčov čo zabezpečuje

- vyšší výkon,
- lepšiu ochranu proti zlyhaniu lasera,
- minimalizovanie scintilačných účinkov.

Napriek tomu, vynikajúci vysieláč a prijímač nestačí. Spoj môže byť účinný len ak je vysielaný lúč stále mierený na prijímač (fotodetektor) čo znamená, že zladenie vysieláča a prijímača je veľmi dôležité. Rovnako dôležité je aj aby stred lúča bol zameraný na prijímačom fotodetektore po celú dobu, i keď prijímač alebo vysieláč nie je stabilný, čo je spôsobené silným vetrom, ktorý na ne pôsobí. To znamená, že FSO systém by mal obsahovať zariadenie na neustále sledovanie pozícií prijímača, vysieláča a automaticky udržiavať zarovnanie vysieláč - prijímač. Je zrejme, že ak toto zariadenie neobsahuje a vysieláč/prijímač nie je stabilný môže sa stať, že spojenie bude nefunkčné.[1]

1.6 Konfigurácia FSO spojov

FSO spoje môžu byť používané vo vnútornom alebo vonkajšom prostredí. Do jednotlivých prostredí sú navrhované tak aby spĺňovali špecifické požiadavky aplikácii. Do vnútorného prostredia môžeme FSO spoje zaradiť do kategórie podľa existencie prekážok medzi vysieláčom a prijímačom a to na spoje s priamou viditeľnosťou (LoS) a nepriamou viditeľnosťou (non-LoS). V závislosti podľa stupňa smerovanie (podľa veľkosti zorného uhla FOV) vysieláča, prijímača alebo oboch ich môžeme rozdeliť na smerové (prijímač a vysieláč majú úzky zorný uhol), nesmerové (široký zorný uhol pre prijímač a vysieláč) a hybridné (prijímač alebo vysieláč majú široký zorný uhol). V konfigurácii s priamou viditeľnosťou (LoS) neexistujú žiadne prekážky medzi vysieláčom a prijímačom, a preto môžu byť nasmerované priamo na seba. U konfigurácie s nepriamou viditeľnosťou (non LoS) je priame spojenie vylúčené z dôvodu existencie prekážok, preto je táto konfigurácia závislá od odrazivosti materiálov, od ktorých sa odrazí a tak vytvorí spojenie.

Konfigurácia s priamou viditeľnosťou (LoS) má z dôvodu nutnosti priamej viditeľnosti minimálne straty viaccestným šírenom, taktiež má dobrú výkonovú úroveň. Nevýhodou tejto konfigurácie je nulová mobilita, existencia prekážok medzi hlavicami a nutnosť presného zamerania hlavíc.

U smerovej LoS konfigurácie je vysielaný výkon sústredený do úzkeho zväzku svetla, čo umožňuje tejto konfigurácii dosiahnuť maximálnu výkonovú úroveň. Keďže je použitý prijímač s úzkym zorným uhlom, dochádza k zníženiu pravdepodobnosti dopadu okolitého svetla, ktoré je nežiaduce. Špeciálny druh priamej LoS konfigurácie je sledovacia konfigurácia, ktorej princíp je založený na tom, že hlavice prijímača a vysielача sú uložené na pohyblivé zariadenia, ktoré umožňujú presné zameranie hlavíc. Nutná podmienka ale je znalosť presných polôh hlavíc. V tejto konfigurácii je možné dosiahnuť

- maximálnu výkonovú účinnosť,
- široké pokrytie,
- vysokú prenosovú rýchlosť.

Ďalším špeciálnym druhom priamej LoS konfigurácie je bunková technológia. V tejto konfigurácii je potrebné niekoľko vysieláčov, ktoré pokryjú časť priestoru. Medzi jednotlivými časťami musí byť minimálna vzdialenosť, z dôvodu zachovania mobility. Zorné uhly (FOV) vysielача a prijímača sú približne 40°. Výhodou bunkovej technológie je vysoká mobilita, minimálne viaccestné šírenie a dobrá výkonová úroveň. Problém nastáva pri zatienení trasy objektmi alebo osobami.

Nesmerová LoS konfigurácia býva vytvorená poľom smerových vysieláčov a prijímačov orientovaných do rôznych smerov. Ako už bolo spomenuté hybridná LoS konfigurácia je taká, kde jedná z hlavíc má úzky zorný uhol FOV, pričom druhá má široký FOV. Úzky smerový vysieláč, ktorý má optimalizovanú výkonovú úroveň, a prijímač ktorý má široký uhol FOV je typická hybridná LoS konfigurácia. Z dôvodu, že prijímač má široký zorný uhol FOV môže zachytiť signál od iných vysieláčov.

V smerovej non LoS konfigurácii je použitý vysieláč a prijímač s úzkym zorným uhlom FOV. Vysieláč a prijímač spolu komunikujú pomocou odrazu, čím je možné prekonať prekážku, ktorá je v priamej viditeľnosti medzi nimi. Viaccestné šírenie je minimálne, keďže dochádza len k jednému odrazu, problémom sa ale stáva presné zameranie hlavíc.

Hybridná non LoS konfigurácia používa na komunikáciu taktiež odraz. Vysieláč má úzky zorný uhol FOV, prijímač úzky FOV, alebo naopak. V tejto konfigurácii je dôležité presné zameranie optických hlavíc. Výhodou je lepšia citlivosť prijímača pokiaľ má úzky zorný uhol FOV. Nevýhodou tejto konfigurácie je viaccestné šírenie.

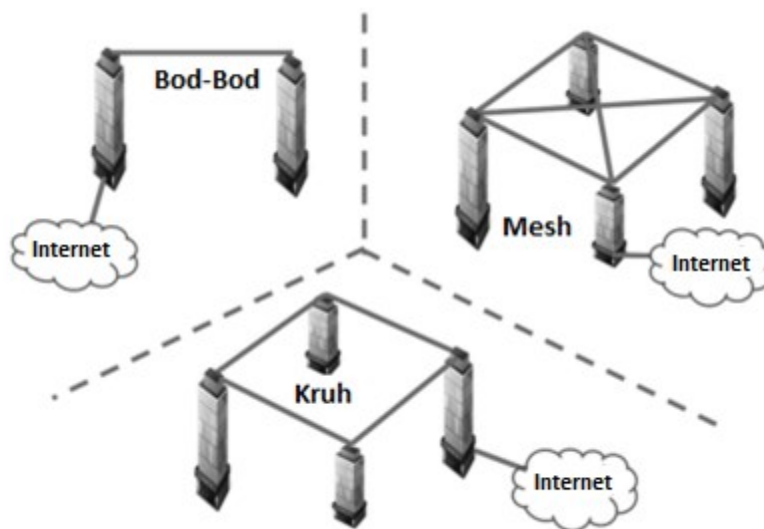
Nesmerová non LoS konfigurácia, často tiež nazývaná ako difúzna konfigurácia vysielala široký zväzok a prijímač má široký FOV. V tejto konfigurácii nie je potrebné presné zameranie hlavíc alebo priama viditeľnosť. Keďže využíva odrazy od stien a stropu, ktoré sú z materiálov s vysokou odrazivosťou a nízkou absorpciou, vysielaný výkon sa rozloží po celej miestnosti. Táto konfigurácia ponúka maximálnu mobilitu i pres prekážky, a preto trpí viaccestným šírením

čo limituje prenosovú rýchlosť. Prijímače musia mať veľký dynamický rozsah a musia byť schopné prijímať rozdielne hladiny výkonu, čo zvyšuje zložitosť systému.

Väčšina výrobcov FSO systémov pre vnútorné a vonkajšie použitie používa priamu LOS konfiguráciu popri prípade hybridnú LOS konfiguráciu. [3]

1.7 Topológie FSO

Pred existenciou sietí postavených na FSO sa používali dlhé trasy v komunikačnej sieti. V poslednej dobe boli metropolitné siete rozdelené na jadro, prístup a okraje. K dispozícii sú topológie typu kruh, mesh, bod-bod už v existujúcich telekomunikačných sieťach. [2]



Obrázok 1.11: Príklad základných topológií sietí[1]

Systémy typu bod-bod sú spojenia medzi 2 bodmi. Tieto body môžu byť budovy v areáli univerzity, body v rámci kruhu, pripojenie kruhu k rozbočovaču alebo pre pripojenie viacerých LAN. Siete typu bod-bod sú jednoduché, nákladovo efektívne, škálovateľné. Tieto systémy sa rýchlo a ľahko nasadzujú. [2]

1.7.1 Topológia typu bod-viacbodov

FSO topológia typu bod-viacbodov môže byť používaná v prístupových sieťach. Táto topológia sa stáva komplexnejšou v zostupnom smere ako v vzostupnom smere. Príčinou je nutné používať veľké množstvo lúčov, každý lúč pre každé uzol v tejto topológii. Sú dva prípady používania tejto topológie.

- Prvý, využíva lúč typu broadcast (určený pre všetkých), ktorý sa rozprestiera na širokom uhle pre pripojenie k všetkým bodom a uzlom.
- Druhý, využíva pre pripojenie ku každému koncovému uzlu iný lúč.

Je zrejmé, že prvý prípad je jednoduchší a lacnejší ako druhý prípad. FSO topológia typu bod-viac bodov nebola ešte nasadená. Lepšia topológia na nasadenie je typu bod-bod FSO

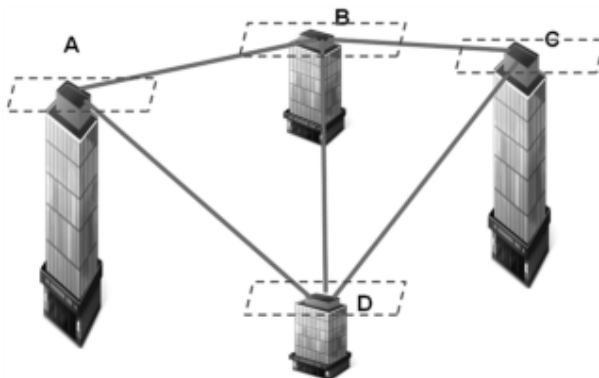
spoja k uzlom, pričom optický signál je premenený a vysielaný k viacerým bodom cez inú bezdrôtovú technológiu napríklad WiMAX (IEEE 802.16), ktorý podporuje dátovú rýchlosť pre zostupný smer 37 Mbit.s^{-1} respektíve 10 Mbit.s^{-1} pre vzostupný smer. [1]



Obrázok 1.12: Príklad FSO topológie typu bod-viacbodov[1]

1.7.2 Topológia typu mesh

Sieť typu mesh je realizovaná prepájaním každého bodu s ďalšími bodmi. Toto riešenie je špeciálny prípad topológie bod-bod, v ktorom každý bod je spojený s ďalšími bodmi, tak že tvoria sieť, ktorá umožňuje zaistenie redundancie. Mesh siete sú viac vyskytované v diaľkových sieťach, ale pomaly sa začínajú presúvať do metropolitných sietí jadier. Nasadzovanie je spomaľované z dôvodu nákladov a zložitosti. [2] Topológia mesh je schopná prepojiť veľa uzlov a je závislá na aplikácii, vzdialenosti medzi uzlami. Mesh môže byť na území niekoľkých sto metrov až niekoľko pár kilometrov. [1]



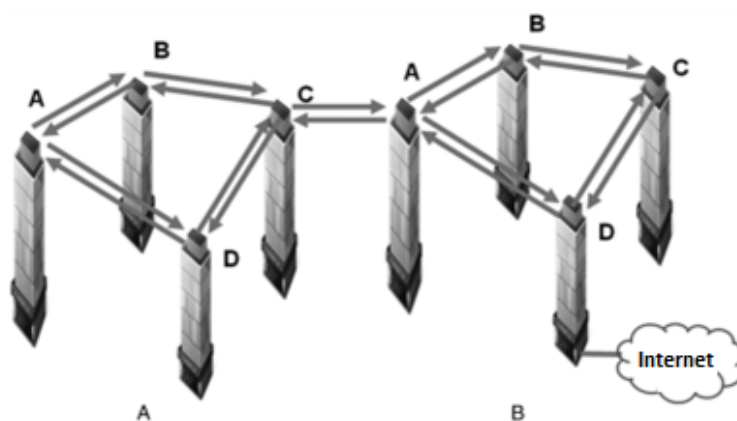
Obrázok 1.13: Príklad mesh topológie[1]

1.7.3 Topológia kruh

Topológia kruh je jednou z najčastejšie nasadzovaných topológií. Môžeme ju nájsť v chrbticovej sieti hustých metropolitných sietí. Poskytovatelia služieb nasadzujú túto architektúru s cieľom zabezpečiť redundanciu a spoľahlivosť sietí. FSO spoj sa používa

na pripojenie ďalších kruhov, tak že umožňujú poskytovateľom služieb tvoriť prepojenú sieť za zníženú cenu. [2]

Kruhová topológia s obojsmernými spojmi je viac náchylná k chybám, ale pri použití mechanizmu na slučky prevádzky sa výpadok izoluje, a tak služby nie sú nedostupné. V tomto prípade je vhodná FSO kruhová topológia, pretože FSO spoje pracujú v plnom duplexe (obojsmerná komunikácia súčasne) a tým obojsmerne. Avšak FSO uzol by mal byť schopný podporovať slučky, mechanizmus pre detekciu poruchy a protokoly k aktivácii slučky. V aktuálnych sieťach, kruh musí byť spojený so sieťou, tak aby bola umožnená konektivita ľubovoľného uzla s iným uzlom. [1]



Obrázok 1.14: Príklad spojenia siete topológií kruh[1]

2 Vplyv atmosféry na FSO

Ako je dokázané atmosféra sa skladá z molekúl kyslíka, dusíka a iných prvkov. Je taktiež zrejmé, že atmosféra sa skladá aj z veľkého množstva vodnej pary, ako aj z ďalších zložiek, ktoré závisia od zemepisných oblastí (napr. znečistené oblasti čiastočky prachu atď.). Tieto častice môžu absorbovať alebo rozptýliť fotóny šíriace sa atmosférou. Aj keď nie je možné meniť fyzikálne vlastnosti atmosféry, je možné správne využívať výhody atmosférických okien výberom správnej vlnovej dĺžky pre dané okná. Na zabezpečenie minimálneho množstva útlmu signálu z rozptylu a absorpcie pracujú FSO systémy v blízkej IR oblasti spektra. Ako bolo spomenuté v kapitole 1.3, základné FSO pracujú v oblasti od 800 nm do 1550 nm vlnovej dĺžky. Existujú okná na vlnovej dĺžke 3 až 5 μm a 8 až 14 μm , pre ktoré je komerčné využitie obmedzené, ale vznikajú problémy s dostupnosťou komponentov a náročného spojenia s praktickým vykonávaním (napríklad chladenie).[2]

2.1 Straty atmosférického kanálu

Mechanizmy strát FSO sú praktický totožné v porovnaní s radiofrekvenčným (RF) prenosom, ale slabnutie signálu je vyššie ako u RF signálov. Optický signál šírený voľným priestorom je veľmi citlivý na atmosférické podmienky. Pre optické žiarenie prenášané atmosférickým kanálom interakcie medzi fotónmi a molekulami atmosféry spôsobujú, že niektoré z týchto fotónov zaniknú alebo sa rozptýlia. Tieto udalosti nakoniec vyvrcholia do prenosových strát popísaných Beer Lambertovým zákonom. Beer Lambertov zákon opisuje priepustnosť optického poľa v atmosfére ako funkciu vzdialenosti šírenia. Okrem toho, optické žiarenie sa pri prechode v dôsledku difrakcie atmosférou rozkladá (divergencia lúča), čo spôsobuje, že veľkosť prijatého lúča môže byť väčšia než je prijímací otvor.

Divergenciu lúča môžeme minimalizovať použitím veľmi úzkych koherentných laserov ako zdrojov svetla. Atmosférické absorpčné straty možno znížiť použitím vlnových dĺžok, ktoré spadajú do nízko spektrálnych prenosových okien vo viditeľnom alebo infračervenom rozsahu. Koncentrácie látok v ovzduší, ktoré často vedú k útlmu signálu závisia no aktuálnom mieste, čase a poveternostných podmienok. Pre pozemné FSO spoje prenášajúce optický signál cez atmosféru je optický výkon prijatý na prijímači P_r závislí na prenášanom výkone P_t a to:

$$P_r = P_t \times e^{-\tau_{od}}, \quad (2.1)$$

kde τ_{od} je optická hĺbka. Časť prenášaného výkonu v optickom spoji je definovaná ako priepustnosť a daná ako:

$$T = \frac{P_r}{P_t} = e^{-\tau_{od}}. \quad (2.2)$$

Optická hĺbka a optická atmosférická priepustnosť súvisí s koeficientom útlmu atmosféry a dĺžkou prenosu L a to podľa Beer Lambertovho zákona ako:

$$T(\lambda, L) = \frac{P_r}{P_t} = \exp(-\alpha(\lambda)L), \quad (2.3)$$

kde $\gamma_t(\lambda)$ a $T(\lambda, L)$ reprezentujú útlmový/extinkčný koeficient (m^{-1}) a priepustnosť atmosféry na vlnovej dĺžke λ . Poznamenajme, že γ je optický zdroj (laser) o špecifickej vlnovej dĺžke so závislosťou na distribúcii atmosférických zložiek, a ktorý je definovaný ako:

$$\gamma = -10 \log_{10} T = 4,43 \times \tau_{od}, \quad (2.4)$$

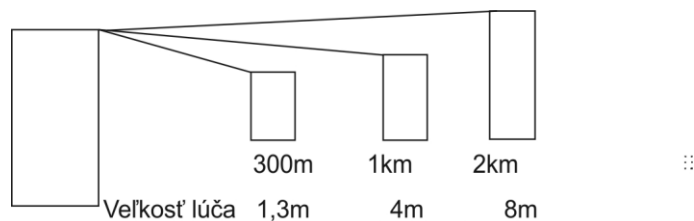
pre τ_{od} 0,7 odpovedajú straty 3 dB. [6]

2.1.1 Optické straty

Prvý zdroj strát vo FSO systéme je spôsobený nedokonalosťou optických šošoviek a iných optických prvkov. Napríklad, šošovka môže prenášať 96% svetla, ale 4 % svetla sa odrazí alebo absorbuje a už nie je dostupné. Ak zohľadníme tento fakt, tak budeme uvažovať o optických stratách. Množstvo strát závisí na charakteristike zariadenia a kvalite šošoviek. Tieto hodnoty je potrebné zmerať, alebo odvodiť od výrobcov optických komponentov.

2.1.2 Geometrické straty

Termín geometrické straty sa vzťahuje na straty, ku ktorým dochádza v dôsledku odlišnosti optického lúča. Typicky, FSO systém je navrhnutý tak, že sa lúč odchyľuje po ceste od vysielача k prijímaču nejakým množstvom. V niektorých systémoch, ktoré používajú aktívne sledovanie, tento rozdiel môže byť pomerne malý. V systémoch, ktoré nepoužívajú aktívne sledovanie, divergencia lúča je navrhnutá tak, že keď lúč kolíše, určitá časť z neho dopadne vždy na prijímač a tým bude spojenie zachované. Výsledkom ale môže byť aj divergencia tak veľká, že svetlo nikdy nedopadne na prijímač. Straty sú rovné ploche prijímača zbernej optiky vzhľadom na plochu lúča na prijímači. Plocha lúča na prijímači môže byť vypočítaná s použitím jednoduchého geometrického vzorca za predpokladu, že sa vyskytuje divergencia pri konštantnej rýchlosti ako náhle je lúč vysielaný z vysielача. Obrázok 2.1 ukazuje predpokladaný priemer lúča pre lúč s rozbiehavosťou 4mrad a vzdialenosti 300, 1000 a 2000 metrov. Na týchto vzdialenostiach sa lúč postupne zväčšuje na 1 m, 4 m a 8 metrov.



Obrázok 2.1: Veľkosť lúča pre rôzne vzdialenosti [2]

Predpoklad lineárneho lúča je veľmi presný, lebo väčšina systémov je určená pre prevádzku za podmienok, keď je možné Rayleigho prenos zanedbať. Preto je pomer plánovanej veľkosti plochy lúča a plocha optického prijímača ako:

Pomer = [(Priemer prijímacej optiky) / (Priemer vysielacej optiky + Vzdialenosť × divergentný uhol)]

Ak meriame priemery v cm, vzdialenosť v km a divergenciu v mrad, vzťah bude nasledovný:

$$\frac{A_R}{A_B} = \left(\frac{D_R}{D_T + 100 \times d \times \theta} \right)^2, \quad (2.5)$$

v ktorom A_R je plocha prijímača, A_B plocha lúča. Vzťah môžeme vyjadriť v dB. [2]

2.1.3 Straty spôsobené zameraním systému

Straty spôsobené zameraním systému vznikajú, ak je vzdialenosť medzi vysielačom a prijímačom taká veľká, že v priebehu spoja je ťažké vidieť na druhú stranu. Alebo ak sledovací systém obsahuje chyby, tým môžu vzniknúť ďalšie straty, pretože vysielač nemieri dostatočne presne na prijímač. Tieto možné problémy sú spozorované pri spojoch presahujúcich vzdialenosť 3 km. [2]

2.2 Beerov zákon

Beerov zákon popisuje útlm svetla prenášaného atmosférou spôsobeného v dôsledku absorpcie a rozptylu. Všeobecne platí, že prenos τ , žiarenia v atmosféra ako funkcia vzdialenosti x , je daná Beerovým zákonom ako:

$$I_R/I_O = \tau = e^{(-\gamma x)}, \quad (2.6)$$

kde I_R/I_O je pomer medzi prijímanú intenzitou I_R na umiestnení x a počiatočnou intenzitou I_O , γ je koeficient útlmu.

Koeficient útlmu je súčtom 4 individuálnych parametrov:

- koeficient rozptylu na molekulách a aerosóloch α ,
- koeficient absorpcie na molekulách a aerosóloch β .

Každý koeficient závisí na vlnovej dĺžke. [2]

Koeficient útlmu je teda daný ako:

$$\gamma(\lambda) = \alpha_m + \alpha_m + \beta_m + \beta_a. \quad (2.7)$$

2.3 Beer Lambertov zákon

Beer Lambertov zákon sa môže použiť na vyjadrenie lineárneho prenosu monochromatického svetla atmosférou:

$$I_1(\lambda, t', x) = I_O(\lambda, t, 0) \times e^{-\int_0^x \alpha_e N(x', t) dx}, \quad (2.8)$$

kde I_1 je intenzita optického zväzku po prechode trasou o dĺžke x , α_e je koeficient útlmu, N je priestorové a časové rozloženie, λ je vlnová dĺžka monochromatického svetla a parameter t vyjadruje potenciálne oneskorenie šírením. Člen $N(x', t)$ vyjadruje priestorovú a časovú zmenu koncentrácie útlmových častíc. Rovnicu môžeme zjednodušiť na tvar :

$$I_1(\lambda, t', x) = I_O(\lambda, t, 0) \times e^{-\alpha_e N(\lambda)}, \quad (2.9)$$

kde x je opäť dĺžka trasy.

Celkový útlmový koeficient sa dá rozpisovať ako súčet koeficientov, ktoré určujú rôzne javy, ktoré spôsobujú útlm (zoslabenie) optického zväzku. V atmosfére sa najviac prejavuje Rayleigeho a Mieov rozptyl, lineárna absorpcia. Celkový útlmový koeficient:

$$\alpha_e(\lambda) = \alpha_a(\lambda) + \alpha_R(\lambda) + \alpha_M(\lambda), \quad (2.10)$$

kde jednotlivé zložky určujú absorpciu, Rayleigov a Mieov rozptyl. [3]

2.4 Rozptyl

Rozptyl sa odkazuje na povahu svetla, ktoré sa snaží prejsť atmosférou. Rozptyl svetla výrazne ovplyvňuje výkon FSO systémov. Rozptyl nesúvisí so stratou energie spôsobenú absorpčným procesom svetla, ale skôr s presmerovaním alebo ďalším šírením svetla, ktoré môže viesť k výraznému zníženiu intenzity svetla prijímaného na prijímači.

Existuje niekoľko režimov rozptylu, v závislosti na charakteristickej veľkosti častíc, na prenosovej ceste. Popis rozptylu je daný ako:

$$x_0 = \frac{2\pi \times r}{\lambda}, \quad (2.11)$$

kde λ je vlnová dĺžka a r polomer častice.

Pre $x_0 \ll 1$, je rozptyl v Rayleighov režime, pre $x_0 \gg 1$ je rozptyl v Mieov režime. Pre $x_0 = 1$ môže byť rozptyl riešený pomocou geometrickej optiky.

V porovnaní s vlnovými dĺžkami v infračervenej oblasti, ktoré sa spravidla používajú vo FSO, priemerný polomer častíc hmly je približne rovnakej veľkosti ako vlny v tejto oblasti. Čo je hlavný dôvod prečo je hmla najväčším problémom pre prenos lúča. Dážď a častice snehu sú väčšie, a teda predstavujú podstatu menšiu prekážku pre lúč. [2]

2.4.1 Geometrický rozptyl

Geometrický rozptyl nastane, keď sú častice v atmosfére rádovo omnoho väčšie ako vlnová dĺžka prenosu. Vo FSO aplikáciách je laserové svetlo do $1,5 \mu\text{m}$ a veľkosť častíc je v rádoch milimetrov. Tieto častice môžu byť napríklad pôda, piesok, prach, ktoré sa vyskytujú vo vzduchu počas búrok a silného vetru v rôznych častiach sveta (púšte, poľnohospodárske plochy, vulkanická činnosť a iné). Rozptyl a útlm svetla závisí na hustote častíc na cm^3 alebo m^3 , a je oveľa výraznejší ako Rayleighov alebo Mieov rozptyl. Tabuľka 2.1 zobrazuje odhadovaný polomer molekúl a častíc v atmosfére. [1]

Tabuľka 2.1: Priemer rôznych častíc

Typ častíc	Priemer (μm)
Molekuly vzduchu	Približne 0,0001
N ₂	0,000075
CO ₂	0,000323
O ₂	0,000292
Opar	0,01-1
Hmla	1-20
Dážď	100-1000
Sneh	1000-5000
Krupobitie	5000-50000

2.4.2 Rayleigho rozptyl

Žiarenie dopadajúce na viazané elektróny atómu alebo molekuly indukuje nerovnováhu náboja alebo dipólu, ktorý kmitá na frekvencii dopadajúceho žiarenia. Oscilačné elektróny prenášajú svetlo vo forme rozptýlenej vlny svetla. Rayleigho klasický vzorec je nasledovný:

$$\beta_s = \frac{f \times e^4 \times \lambda_0^4}{6\pi \times \varepsilon_0^2 \times m^2 \times c^4} \times \frac{1}{\lambda^4}, \quad (2.12)$$

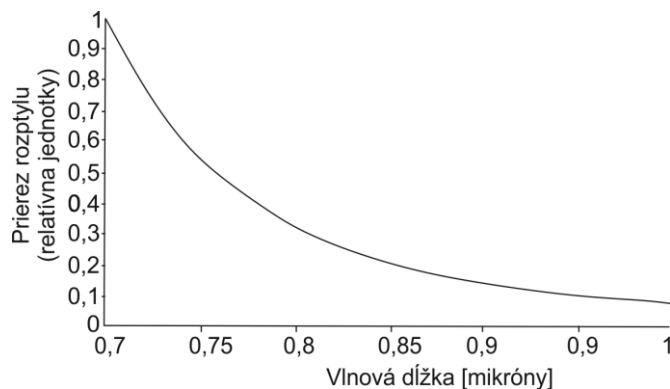
kde f je oscilačná frekvencia, e je náboj elektrónu, λ_0 vlnová dĺžka odpovedajúca vlastnej frekvencii, $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, ε_0 dielektrická konštanta (permitivita 1,000589), c rýchlosť svetla ($3 \times 10^8 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$), m je hmotnosť oscilačného subjektu. λ^4 závislosť a veľkosť častíc nachádzajúcich sa v atmosfére znamená, že kratšie vlnové dĺžky svetla sú oveľa viac rozptýlené ako dlhšie vlnové dĺžky. [2]

Zjednodušene je Rayleigho rozptyl popísaný ako:

$$\beta_s(\lambda) = 0,827 \times N_p \times A_p^3 \times \lambda^{-4}, \quad (2.13)$$

kde N_p je počet častíc na jednotku objemu pozdĺž cesty šírenia, A_p reprezentuje prierez rozptylu. Úmernosť Rayleigho rozptylu λ^{-4} naznačuje, že kratšie vlnové dĺžky sú rozptýlené viac. [6]

Rayleigho rozptyl je dôvod prečo sa obloha javí ako modrá pri jasnom počasí. Avšak, pre FSO systémy, ktoré pracujú na väčšej vlnovej dĺžke blízkej IR vlnovej dĺžky je možné vplyv Rayleigho rozptylu na prenos signálu zanedbať. Závislosť vlnovej dĺžky na prierezu Rayleigho rozptylu v IR oblasti je zobrazené na obrázku 2.2. [2]



Obrázok 2.2: Rayleigho rozptyl vs vlnové dĺžky v IR oblasti[2]

2.4.3 Mieov rozptyl

Mieov rozptyl nastáva pri časticiach v atmosfére s rovnakou veľkosťou ako je vlnová dĺžka prenášaného lúča. Preto sa v blízkej IR oblasti vlnových dĺžok tieto častice (hmla, opar, znečistenie - aerosóly) považujú ako hlavný vplyv spôsobujúci Mieov rozptyl. Teória je zložitá, ale dobre pochopiteľná. Problém nastáva pri porovnaní teórie a experimentu. Pretože absorpcia je dominantná pre väčšinu spektra, dáta musia byť zhromažďované v rozmedzí vlnových dĺžok, ktoré sa vyskytujú v atmosférickom okne za predpokladu, že prebieha len rozptyl. Pre aerosóly tento prenos závisí aj na mieste, čase, vlhkosti, rýchlosti vetra. Zjednodušený empirický vzorec, ktorý sa používa pre FSO systémy na dlhú vzdialenosť pre výpočet koeficientu útlmu v dôsledku Mieho rozptylu je daný:

$$\gamma = \frac{3,91}{V} \times \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-5} = \text{pre} \begin{cases} \delta = 0,585 \times V^3 & \text{pre } V < 6 \text{ km} \\ \delta = 1,6 & \text{pre } V > 50 \text{ km} \\ \delta = 1,3 & \text{pre } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} . \end{cases} \quad (2.14)$$

V tomto vzorci V zodpovedá viditeľnosti, λ je vlnová dĺžka prenosu a δ je koeficient veľkosti častíc. Avšak, táto rovnica bola nedávno spochybnená výskumnou komunitou FSO. Závislosť vlnovej dĺžky prenosu na koeficientu útlmu γ nerespektuje tento vzorec. Presnejšia numerická simulácia vzorca pre Mieov rozptyl naznačujú, že koeficient útlmu nie je výrazne závislý na vlnovej dĺžke, pokiaľ ide o vlnové dĺžky v blízkej IR oblasti. A teda, z empirického pozorovania môže byť odvodené, že Mieov rozptyl spôsobený hmlou charakterizuje útlm primárneho zdroja lúča, a taktiež tento efekt sa geometrický zvyrazňuje zvyšujúcou sa vzdialenosťou. Pre všetky praktické účely musia byť preštudované podmienky viditeľnosti vo FSO oblasti. Údaje viditeľnosti zhromažďované v priebehu niekoľkých rokov sú k dispozícii od National Weather. Služby môžu byť použité na určenie závislosti na vzdialenosti pre určitú geografickú oblasť. Avšak, komplikácie vyplývajú zo skutočnosti, že poveternostné podmienky sú zvyčajne merané na letiskách, ktoré môžu byť umiestnené ďaleko od skutočného miesta kde je prevádzkovaný FSO systém. Prostredie so častými výkyvmi v mikroklimá sú obzvlášť náročné. Pri nasadení väčšiny komerčných FSO systémov, vyžaduje prevádzka v hustej hmle udržiavanie krátkej vzdialenosti medzi FSO systémami na udržanie vysokej úrovne dostupnosti systému. Pre dosiahnutie 99,99 % dostupnosti sú vzdialenosti udržiavané pod 200 metrov. [2]

2.5 Absorpcia

Absorpcia nastáva, keď prebieha interakcia šírených fotónov s molekulami prítomných v atmosfére pozdĺž cesty šírenia. Fotón je absorbovaný, keď kvantový stav molekuly je excitovaný na vyššiu energetickú hladinu. Niektoré fotóny zaniknú a ich energia sa mení na teplo. Absorpčný koeficient je silne závislý na type molekúl a ich koncentrácii v atmosfére. Taktiež je závislý na vlnovej dĺžke prenosu, a preto existujú v atmosfére transparentné rozsahy vlnových dĺžok s minimálnou absorpciou nazývané ako prenosové okná. [6]

Atómy a molekuly v atmosfére sú charakterizované ich indexom lomu. Imaginárna časť indexu lomu k , je spojená s absorpčným koeficientom α , ktorý je daný ako:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a \times N_a, \quad (2.15)$$

kde σ_a je absorpcia prierečnej oblasti a N_a je koncentrácia absorbujúcich častíc. [2]

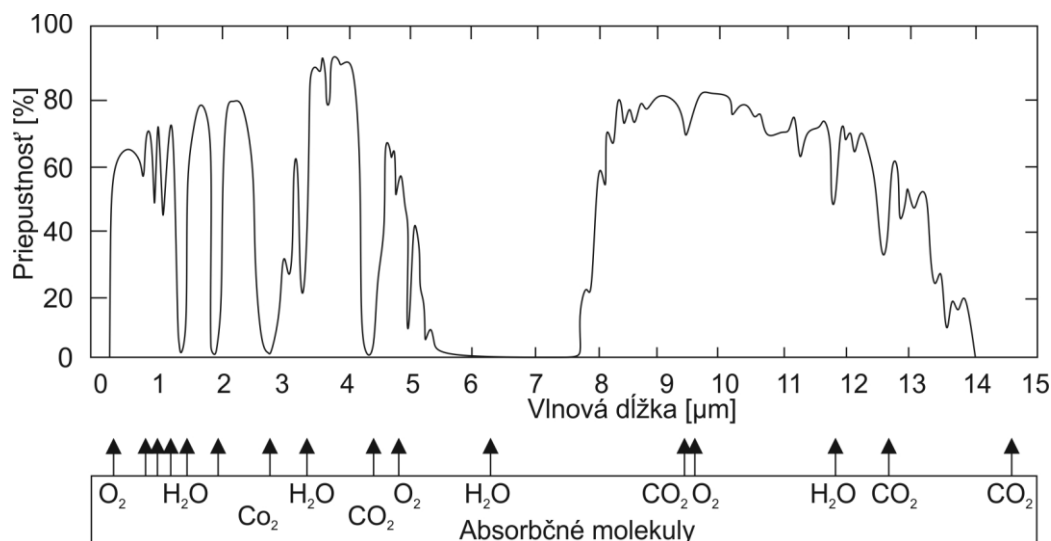
2.5.1 Atmosférické prenosové okno

V atmosférickom prenosovom okne, najviac používanom vo FSO v IR oblasti sú ako absorpčné častice najčastejšie voda, oxid uhličitý a ozón. Typické absorpčné spektrum je znázornené na obrázku 2.3. Vibračné a rotačné energetické stavy týchto častíc sú schopné absorpcie v mnohých skupinách. Existujú dobre známe okná medzi 0,72 a 15 μm s úzkymi hranicami. Oblasť 0,7 - 2 μm dominuje absorpciou vodnej pary, kým v oblasti 2-4 μm dominuje absorpcia kombinácie vody a oxidu uhličitého. [2]

Molekulová absorpcia je selektívny jav, ktorý vedie k spektrálnemu prenosu atmosférou v prehľadných zónach, tzv. atmosférických prenosových oknách alebo v neprehľadných zónach nazývané ako atmosférické blokované okná. [5]

Tabuľka 2.2: Hlavné atmosférické prenosové okná v optickom rozsahu

Viditeľná oblasť a veľmi blízka IR oblasť	Od 0,4 do 1,4 μm
Blízka IR oblasť alebo IR I	Od 1,4 do 1,9 μm a 1,9 do 2,7 μm
IR oblasť alebo IR II	Od 2,7 do 4,3 μm a 4,5 do 5,2 μm
Ďaleká IR oblasť alebo IR III	Od 8 do 14 μm
Extrémna IR oblasť alebo IR IV	Od 16 do 28 μm



Obrázok 2.3: Atmosférická priepustnosť meraná 1820 m nad morom v horizontálnom smere[6]

2.5.2 Absorpcia atmosféry

Prebytok molekúl absorpčného typu určuje, ako silno bude zoslabený signál. Tieto typy môžu byť rozdelené do dvoch hlavných skupín: molekulárne a aerosólne typy absorberov. Obrázok 2.4 ukazuje prenosové spektrum pri podmienkach jasnej oblohy a štandardnej mestskej koncentrácie aerosólov s viditeľnosťou 5 km. V tomto obrázku je zahrnutá absorpcia vodnej pary, oxidu uhličitého atď.[2]

Koeficient absorpcie atmosféry je závislý na type molekúl plynu a ich koncentrácie v atmosfére. Spektrálny rozdiel v koeficiente absorpcie určuje absorpčné spektrum. Povaha tohto spektra je v dôsledku variácií možných energetických hladín vo vnútri plynu je generovaná elektronickými prechodmi, vibráciami atómov a rotáciami molekúl. Nárast tlaku alebo teploty atmosféry má tendenciu rozšíriť spektrálne absorpčné čiary excitáciou nových možných energetických hladín a Dopplerovým javom. [5]

Molekuly plynu majú vyčíslené energetické hladiny pre každý druh. Pod vplyvom dopadajúceho elektromagnetického žiarenia môžu absorbovať energiu (fotón), tak aby nastal prechod z počiatočnej energetickej hladiny E_i na vyššiu energetickú hladinu E_j . Energia žiarenia je potom oslabená stratou jedného alebo viacerých fotónov.

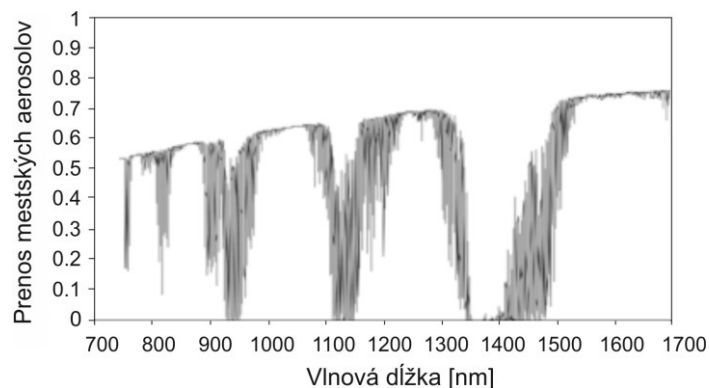
Tento proces nastane iba v prípade ak frekvencia dopadajúcej vlny presne odpovedá jednej rezonančnej frekvencie molekuly danej ako:

$$\nu_0 = \frac{E_j - E_i}{h}, \quad (2.16)$$

kde ν_0 je frekvencia danej vlny, h je Plancková konštanta ($h = 6,6262 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}^{-1}$) a E_i , E_j sú energetické hladiny molekúl.

Základné parametre potrebné na určenie absorpcie generovanou rezonanciou molekúl sú:

- možná energetická hladina pre každý druh molekúl,
- pravdepodobnosť prechodu z energetickej hladiny E_i na hladinu E_j ,
- intenzita rezonančných čiar. [5]

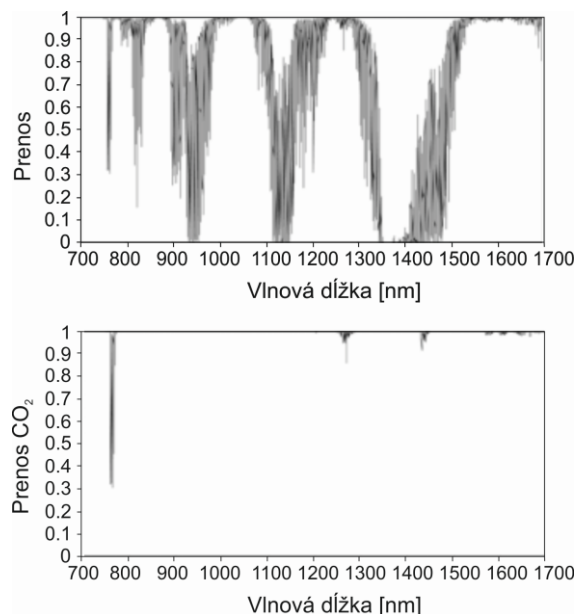


Obrázok 2.4: Prenos ako funkcia vlnovej dĺžky v mestských podmienkach aerosolov pre viditeľnosť 5 km[2]

Všeobecne, profil každej absorpčnej čiary je modifikovaný Dopplerovým javom, keď sa molekuly pohybujú vzhľadom k dopadajúcej vlny a v dôsledku interakcie molekúl. Tento jav vedie k spektrálnemu rozšíreniu prirodzenej čiary každej molekuly.

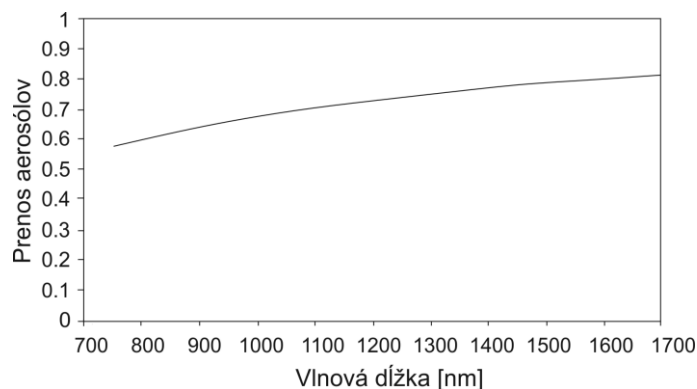
Pre isté molekuly ako napríklad oxid uhličitý (CO_2), vodná para (H_2O), dusík (N_2), kyslík (O_2) sa môžu profily absorpčných čiar predĺžiť z každej centrálnej čiary. Táto vlastnosť vedie k kontinuite absorpcii s frekvenciou nazývanou ako kontinuum. [5]

V blízkej IR oblasti je vodná para primárny molekulárny absorbér s mnohými absorpčnými čiarami pre zoslabenie signálu. Nad 2 μm vlnovej dĺžky zohráva veľkú úlohu vodná para a oxid uhličitý. Vibračné a rotačné prechody určujú, ktoré energie sú ľahšie absorbované. Obrázok 2.5 zobrazuje prenos cez jasnú oblohu len s vodnou parou. Môžeme vidieť, že vodná para je dominantou prenosu na čistej oblohe v blízkej IR oblasti. Veľký počet čiar prispieva ku komplikovanému spektru s občasnými oknami na populárnych FSO vlnových dĺžkach ako sú 850 a 1550 nm. Obrázok 2.5 ukazuje prenos cez oxid uhličitý. Občasné ostré rezonančné špičky prekrývajú celkové relatívne ploché pozadie. [2]



Obrázok 2.5: Prenos na čistej oblohe ako funkcia vlnovej dĺžky pre vodu hore a pre oxid uhličitý dole[2]

Aerosóly sa prirodzene vyskytujú v podobe častíc prachu, morskej soli, púštného prachu a častíc sopečných pozostatkov. Ale taktiež môžu byť vytvorené ako výsledok umelej chemickej premeny stopových plynov na pevné alebo kvapalné častice, poprípade ako priemyselný odpad. Tieto častice môžu mať veľkosť od jemného prachu menšieho ako $0,1\ \mu\text{m}$ po veľké častice väčšie ako $10\ \mu\text{m}$. Odhad hovorí, že 80 % hmotnosti aerosólu je obsiahnutá v najnižšom kilometri atmosféry. Na súši sa vyprodukuje viac aerosólov než nad oceánmi. Severná hemisféra produkuje 61 % z celkového množstva aerosólov na svete. Vzhľadom k malému priemeru IR vĺn, rozptyl na týchto časticiach môže byť problém FSO systémov. Tieto častice taktiež spôsobujú absorpciu v oblasti IR vlnových dĺžok. Napríklad oxid železa má mnoho absorpčných čiar, ale jeho výskyt v atmosfére je obvykle obmedzený. Obrázok 2.6 ukazuje prenos na čistej oblohe vrátane mestských aerosólov. Z porovnania obrázkov 2.5 a 2.6 môžeme zistiť ako ovplyvňujú aerosólové častice prenos cez atmosféru. [2]



Obrázok 2.6: Prenos ako funkcia vln. dĺžky a mestských aerosólov [2]

2.6 Turbulencie

Púšť sa môže javiť ako ideálne miesto pre použitie FSO systémov. To by bola pravda, keby bol dôležitý iba útlm atmosféry, ale v horúcom, suchom podnebí turbulencie môžu spôsobovať problémy s prenosom. Ako sa krajina ohrieva na slnku tak sa rovnako ohrieva aj vzduch. Niektoré časti vzduchu sa ohrievajú viac ako ostatné časti. Čo má za následok zmeny v indexe lomu prostredia, čo spôsobuje zmenu trasy, po ktorej sa svetlo prenáša, zatiaľ čo sa šíri vzduchom. Pretože tieto vzduchové časti (vrecká) nie sú stabilné v čase a priestore bude zmena indexu lomu ako náhodný pohyb. K vonkajšiemu pozorovateľovi sa toto zdá ako turbulentné správanie masy vzduchu.

Na laserové lúče pôsobia tri účinky spôsobené turbulenciou.

- Prvý účinok, lúč môže byť vychýlený náhodne cez meniaci sa index lomu buniek prostredia. Tento jav je známy ako putovanie lúča. Keďže sa lom svetla v prostredí ako je vzduch správa podobne ako keď svetlo prechádza rôznymi inými prostrediami, napr. sklenená šošovka, môže byť svetlo náhodne sústredené alebo rozptýlené podľa zmien indexu lomu pozdĺž prenosovej trasy.
- Druhý účinok, fáza lúča sa môže líšiť, čo je spôsobené kolísaním intenzity alebo chvením vzduchu (scintilácia).
- Tretí účinok, lúč sa môže šíriť dlhšie ako predpovedá difrakčná teória.

Dobrá miera turbulencie je štrukturálny parameter indexu lomu C_n^2 . Pretože vzduch potrebuje čas na ohriatie sú turbulencie typicky najväčšie uprostred popoludnia ($C_n^2 = 10^{-13} m^{-2/3}$) a najmenšie hodinu po východe a západe slnka ($C_n^2 = 10^{-17} m^{-2/3}$). Hodnoty C_n^2 sú zvyčajne najväčšie blízko zeme a klesajú s nadmorskou výškou. Ak sa chce minimalizovať účinok scintilácie na prenos, tak by FSO systémy nemali byť inštalované v blízkosti horúcich povrchov. Dechtové strechy, na ktorých môže vznikať veľké množstvo scintilácii v horúcich letných dňoch, nie sú vhodné pre inštalácie systému FSO. Vzhľadom k tomu, že scintilácia klesá s nadmorskou výškou, odporúča sa inštalovať FSO systémy nad strechu (>1 meter) a ďalej od bočnej steny pokiaľ sa inštalácia nachádza v púšti. [2]

Index lomu vzduchu pri optických frekvenciách je:

$$n - 1 = 77,6 \left(1 + \frac{7,52 \times 10^{-3}}{\lambda^2} \right) \times \left(\frac{p}{T} \right) \times 10^{-6}, \quad (2.17)$$

kde n je celkový index lomu, λ je vlnová dĺžka v μm , p je tlak mb, a T je teplota v Kelvinoch. Na úrovni mora je typická hodnota $n-1 = 3 \times 10^{-4}$ [-]. Účinky vlhkosti sú typický zanedbateľné, pretože vlhkosť ovplyvňuje hodnotu indexu lomu menej ako 1 %. [4]

2.6.1 Turbulentné prúdenie energie

Turbulentné prúdenia sú vlastne nepravidelné fluktuácie rýchlosti prúdenia, ktoré sú spôsobené spojením veľkých zotrvačných síl spolu s časticami kvapaliny s veľmi rôznymi rýchlosťami.

Turbulentné prúdenia sú popísané Reynoldsovým číslom. Turbulentné prúdenie existuje ak toto číslo je v intervale od 2500 do 5000, kde Reynoldsové číslo je definované ako:

$$\text{Re} = \frac{U \times L}{\nu}. \quad (2.18)$$

V tomto vzťahu je U charakteristická rýchlosť prúdenia, L je odpovedajúci rozmer viskózneho prúdenia, a ν je kinetická viskozita kvapalín.

Ak je Reynoldsovo číslo v atmosfére veľké, odpovedajúce prúdenie kvapalín je veľmi nestabilné. Víry závislé na veľkosti rozmerov prúdenia sa pohybujú náhodne, a v konečnom dôsledku vedú k vírom menších rozmerov a nižších rýchlostí. Nakoniec, víry sú natoľko malé, že veľkosť viskozity prekonáva zotrvačné sily a vír upadá.

Úpadok víru je daný:

$$\text{Re}^j = \frac{U^j \times L^j}{\nu^j}, \quad (2.19)$$

kde j je rád víru. Vyšší rád označuje menšie víry.

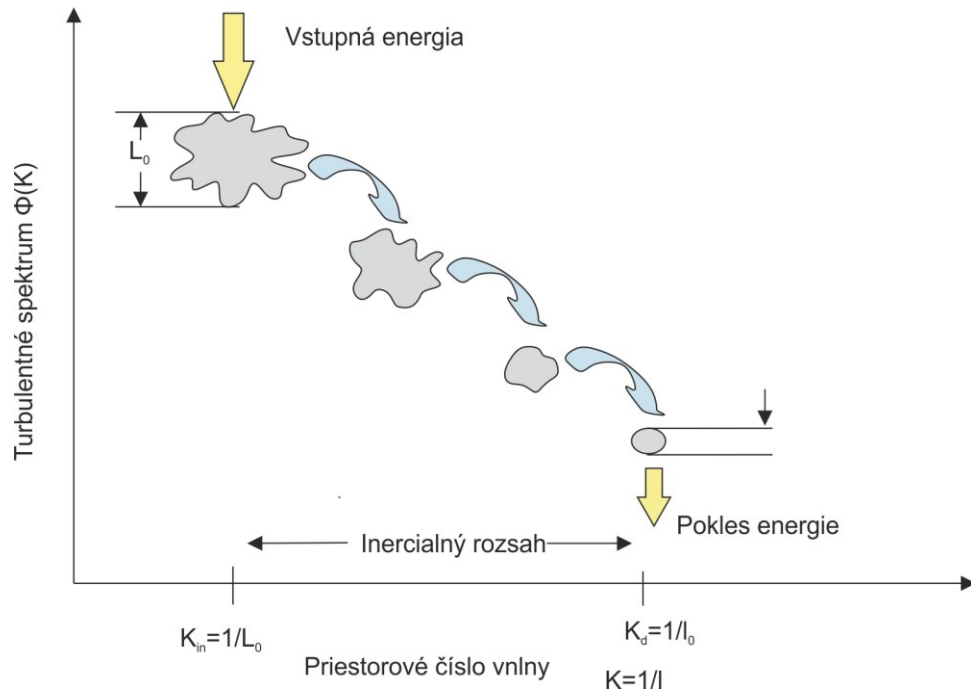
Richardson ako prvý navrhol prerozdeľovanie turbulencie energie v atmosfére. Tento proces je ukázaný na obrázku 2.7, kde sú oblasti ako oblasť vstupnej energie, inerciálna submierka a oblasť rozptylu energie. Miera rozptylu ε je daná rýchlosťou víru U_l s charakteristickou dĺžkou l ako

$$U_l \approx (\varepsilon \times l)^{1/3}. \quad (2.20)$$

Pri veľkých charakteristických dĺžkach l , je časť kinetickej energie v atmosfére premenená na turbulentnú energiu. Keď charakteristická dĺžka dosiahne určitú hraničnú dĺžku stupnice L_0 začína sa energia vrstviť. Energia jedného víru je postupne šírená vo víroch menších mierok, až pokiaľ víri dosahujú veľkosť zhodnú s vnútornou mierkou dĺžky. Vnútorná mierka dĺžky, taktiež nazývaná ako Kolmogorová mikromierka, je definovaná ako:

$$l_0 = 7,4 \times \left(\frac{\nu^3}{s} \right)^{1/4}. \quad (2.21)$$

Na povrchovej vrstve Zeme, je l_0 typicky v rádoch 4 mm, a ν je typický $0,148 \text{ cm}^2 \times \text{s}^{-1}$. Kolmogorov navrhol, že v inerciálnej submierke, kde $L_0 > l > l_0$ je turbulencia izotropná a môže byť prevedená z víru do druhého víru bez straty. Keď priemer slabného víru dosiahne l_0 , je energia víru rozptýlená v podobe tepla cez proces viskozity. [4]



Obrázok 2.7: Znáznornenie procesu turbulentného rozkladu, vrstvenie energie a následné rozdelenie turbulentných vírov v atmosfére[4]

2.6.2 Optické turbulencie

Náhodné zmeny v indexe lomu atmosféry sú označované ako optické turbulencie a sú zodpovedné za náhodné fluktuácie intenzity laserového lúča prenášaného signálu. Tieto turbulencie vyvolávajú difrakciu, ktorá znižuje hustotu výkonu na prijímači a taktiež spôsobujú náhodný pohyb lúča na prijímači. Tieto účinky existujú súčasne s vytvorenými náhodnými stratami signálu v prijímači, čo vedie k zvyšovaniu chybovosti BER systému v dôsledku zoslabujúceho signálu. Taktiež môžu mať na následok úplnú stratu signálu. V dnešnej dobe sú skúmané atmosférické javy, ktoré vedú k optickým turbulenciám. Čoraz častejšie sa diskutuje o rôznych modeloch, ktoré popisujú a kvantifikujú optické turbulencie v atmosfére.

2.7 Štrukturálny parameter indexu lomu

Štrukturálny parameter indexu lomu C_n^2 [$\text{m}^{-2/3}$] je dôležitý parameter na určenie fluktuácie indexu lomu v atmosfére. Tento parameter bol odvodený zo štrukturálneho parametru teploty C_T^2 .

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{p}{T^2}\right) \times C_T^2, \quad (2.22)$$

kde T je teplota a p je tlak.

Štrukturálny parameter indexu lomu závisí na geografickej polohe, ročnom období a na konkrétnej hodine počas dňa. Ak sa používa optický zväzok na horizontálnej trase v konštantnej výške a v krátkom časovom úseku môže byť štrukturálny parameter indexu lomu považovaný za konštantu. Pokiaľ sa optický zväzok používa pri komunikácii na horizontálnej

trase je štruktúrálny parameter indexu lomu závislý na nadmorskej výške $C_n^2(h)$. Pri rastúcej nadmorskej výške tento parameter klesá, približne do výšky 3-5 km. Vo výške približne 10 km nasleduje nárast na maximálnu hodnotu. Po prekročení nadmorskej výšky nad 10 km tento parameter prudko klesá.[3]

Z výsledkov experimentálnych meraní bolo vytvorených niekoľko modelov pre štruktúrálny parameter indexu lomu. Štruktúrálny parameter indexu lomu je definovaný v rôznych vrstvách atmosféry (prízemná, medzná, vyššia vrstva).

2.7.1 Prízemná vrstva

Troposféra často označovaná ako prízemná vrstva je prostredie s najvyšším výskytom turbulencií, a preto je označovaná ako nestabilné prostredie. Výskyt turbulencií v tejto vrstve je závislý na časti dňa. Behom dňa je atmosférické prostredie nestabilné v dôsledku stúpania zahriateho vzduchu do vyšších vrstiev atmosféry. Počas nočnej časti dňa je toto prostredie označované ako stabilné prostredie.

Štruktúrálny parameter indexu lomu je pre túto vrstvu a nestabilné podmienky (deň):

$$C_n^2 = h^{-2/3} \times \left[1 - 7 \left(\frac{h}{L_{ob}} \right) \right]^{-2/3}, L_{ob} < 0. \quad (2.23)$$

Štruktúrálny parameter indexu lomu je pre túto vrstvu a stabilné podmienky (noc):

$$C_n^2 = h^{-2/3} \times \left[1 + 2.4 \left(\frac{h}{L_{ob}} \right)^{2/3} \right], L_{ob} > 0. \quad (2.24)$$

Počas dňa vykazuje štruktúrálny parameter indexu lomu C_n^2 vysokú závislosť na výške ($h^{-4/3}$) s rastúcou vzdialenosťou od povrchu. Počas noci (stabilné podmienky) závisí C_n^2 na $h^{-2/3}$. L_{ob} je Monin-Obukhov dĺžka. Na vyjadrenie tejto dĺžky sa používa rovnica:

$$L_{ob} = \frac{u_*^2 \times \phi}{k^2 \times g \times \phi_*}, \quad (2.25)$$

kde $u_* [m \times s^{-1}]$ je trecia rýchlosť, ϕ [K] potenciálová teplota vzduchu, k predstavuje von Karmanovú konštantu $k = 0,4$, $g [m \times s^{-2}]$ gravitačné zrýchlenie a $\phi_* [K]$ je potenciálna miera teploty. Trecia rýchlosť a potenciálna miera teploty je popísaná v rovnici 2.26.

$$u_* = \frac{k \times u}{\ln \left(\frac{h}{h_0} \right) - \psi_1}, \phi_* = \frac{\phi - \phi_0}{\ln \left(\frac{h}{h_0} \right) - \psi_2}. \quad (2.26)$$

Kde $u [m \times s^{-1}]$ je rýchlosť vetra, ψ_1 je stabilita tlaku (často = 0), ψ_2 je diabatická zmena teploty a $h_0 [m]$ predstavuje výšku porastu. Obhuková dĺžka by mala byť väčšia ako h_0 a nemala by prekračovať 100 metrov. Z dôvodu, že by nebolo možné jednoznačne určiť výšku porastu je odvodená rovnica, ktorá zahrňuje priemernú výšku porastu h_e :

$$\ln(h_0) = -2,85 + 1,19 \times \ln(h_e) \rightarrow h_0 = \frac{h_e^{1,19}}{17,29}. \quad (2.27)$$

Následne štruktúrally parameter teploty C_T^2 bude:

$$C_T^2 = T_*^2 \times h^{-2/3} \times 4,9 \times \begin{cases} \left[1 - 7 \times \left(\frac{h}{L_{ob}}\right)\right]^{-2/3} & \text{pre } L_{ob} < 0 \\ \left[1 + 2,4 \left(\frac{h}{L_{ob}}\right)^{2/3}\right] & \text{pre } L_{ob} > 0, \end{cases} \quad (2.28)$$

kde T_*^2 v prípade rovnice 2.28 predstavuje teplotný parameter vyjadrený násobkom von Karmanovej konštanty a potenciálovej teploty ako: [3]

$$T_*^2 = k \times \phi_*. \quad (2.29)$$

2.7.1.1 Model PAMELA

Model PAMELA poskytuje odhad štruktúrného parametru indexu lomu v prízemnej vrstve. Požadované vstupy sú presná poloha (zemepisná šírka dĺžka), dátum, časť dňa, percento oblačnosti a typ terénu, ako aj meranie (odhad) atmosférickej teploty, tlaku, rýchlosti vetra v požadovanej výške h z odhadu C_n^2 . Pri šikmých dráhach s premennou výškou meracieho prijímača by mal byť použitý najpresnejší odhad C_n^2 . Model PAMELA bol adaptovaný z minulých komplikovaných podobných modelov optických turbulencií. Tieto skoršie modely porovnávali pomerne dobre experimentálne údaje získane na rôznych miestach za rôznych podmienok.

Mechanické a vztlakové prírastky do rozpočtu turbulentnej energie sú popísané ako:

$$\frac{dE}{dt} = M + B - \varepsilon, \quad (2.30)$$

kde E je stredná kinetická energia turbulencie na jednotku hmotnosti, M je miera produkcie energie v dôsledku strihu vetra, B je miera produkcie energie v dôsledku vztlaku a ε je miera rozptylu energie. Z Kolmogorovej hypotézy univerzálnej rovnováhy pre ustálené podmienky platí:

$$\varepsilon = M + B, \quad (2.31)$$

kde miera produkcie energie v dôsledku strihu vetra je daná ako:

$$M = K_m \left| \frac{\partial \theta}{\partial h} \right|^2, \quad (2.32)$$

kde K_m koeficient turbulentnej výmeny pre dynamiku a \bar{v} je priemerná rýchlosť vetra. Rýchlosť produkcie energie v dôsledku vztlaku možno získať z:

$$B = -K_h \left(\frac{g}{\theta} \right) \frac{\partial \theta}{\partial h}. \quad (2.33)$$

V tejto rovnici je g zrýchlenie v dôsledku gravitácie Zeme ($9,8 \text{ m} \times \text{s}^{-2}$), K_h je koeficient turbulentnej výmeny pre teplo, a θ je stredná potenciálna teplota v Kelvinoch. Potenciálna teplota θ a teplota T sú spojené výrazom $\theta = T + 0,0098h$.

Profilové vzťahy pre vertikálne gradienty priemeru rýchlosti vetra a strednú potenciálnu teplotu majú podobné tvary a sú dané ako:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial h} = \left(\frac{u_*}{k_v \times h} \right) \times \phi_m \left(\frac{h}{L} \right) \quad \frac{\partial \theta}{\partial h} = \left(\frac{T_*}{k_v \times h} \right) \times \phi_h \left(\frac{h}{L} \right), \quad (2.34)$$

kde k_v je von Karmanová konštanta, u_* rýchlosť trenia, T_* je charakteristická teplota, $\phi_m (h/L)$ strih vetra, $\phi_h (h/L)$ je teplotný gradient (rýchlosť odchýlenia) a L je Monin-Obukhova dĺžka.

Tvar vzťahov profilu prúdenia sa líši v závislosti na atmosférickej stabilite, ktorá je charakterizovaná Pasquillovou kategóriou stability P . Stabilné atmosférické podmienky nastanú, keď sa začne ochladzovať zemský povrch. Potenciálne sa zvyšuje teplota vzduchu s výškou, tak že masa vzduchu, ktorý je posúvaný vertikálne sa vracia na pôvodnú polohu. Neutrálne atmosférické podmienky sú spojené s absenciou teplotného gradientu. Ak je masa vzduchu posunutá, tak ostane vo svojej novej pozícii. Nestabilné atmosférické podmienky nastanú, keď sa povrch Zeme zahrieva, tak že potenciálna teplota klesá s výškou. Masa vzduchu pohybovaná nahor bude naďalej stúpať. Kategória Pasquillovej stability môžu byť odhadnuté pomocou:

$$P = -\frac{1}{2}(4 - c_w + c_r), \quad (2.35)$$

kde c_r je trieda žiarenia a c_w trieda rýchlosti vetra sa získa z:

$$c_w = \frac{\bar{U}_o}{2}, \quad \bar{U}_o < 8 \text{ m} \times \text{s}^{-1}, \quad (2.36)$$

$$c_w = 4, \quad \bar{U}_o > 8 \text{ m} \times \text{s}^{-1}. \quad (2.37)$$

V rovniciach 2.35 a 2.36 je \bar{U}_o nameraná (alebo odhadnutá) priemerná rýchlosť vetra na referenčnej výške h . Počas dňa je trieda žiarenia c_r definovaná ako:

$$c_r = \frac{R}{300}, \quad (2.38)$$

kde R je slnečné žiarenie dopadajúce na jednotku vodorovnej plochy zemského povrchu v W/m^2 . Pokiaľ je známy parameter Pasquillovej stability P je možné odhadnúť Monin-Obukhovu dĺžku L :

$$L = \left[(0,00435 \times P + 0,0037 \times P^3) \times h_r^{-(0,5-0,23 \times |P|+0,0325 \times P^2)} \right]^{-1}. \quad (2.39)$$

Dĺžka drsnosti povrchu h_r sa vzťahuje k efektívnej aerodynamickej drsnosti povrchu Zeme. Šmykové sily vznikajúce prúdením vzduchu na zemskom povrchu zavádzajú vertikálny gradient rýchlosti vetra. Od výšky približne desaťnásobku dĺžky drsnosti povrchu je vertikálny gradient rýchlosti vetra logaritmický. Dĺžka drsnosti povrchu je spojená s priemernou výškou v centimetroch zemských povrchových vlastností h_f a to:

$$h_r \cong \exp[-2,85 + 1,2 \times \ln(h_f)], \quad h_f < 700 \text{ cm}. \quad (2.40)$$

V tabuľke 2.3 sú zobrazené namerané hodnoty dĺžky drsnosti povrchu pre typické mestské vidiecke podmienky.

V nestabilnej atmosfére (záporné P) profily prúdenia pre bezrozmerný strih vetra $\phi_m(h/L)$ a bezrozmerný teplotný gradient $\phi_h(h/L)$ dostaneme:

$$\phi_m\left(\frac{h}{L}\right) = \left[1 - 16\left(\frac{h}{L}\right)\right]^{-1/4} \quad \phi_h\left(\frac{h}{L}\right) = 0,74 \left[1 - 9\left(\frac{h}{L}\right)\right]^{-1/2}. \quad (2.41)$$

V prípade stabilnej atmosfére (kladné P) majú tvar:

$$\phi_m\left(\frac{h}{L}\right) = 1 + 5\left(\frac{h}{L}\right) \quad \phi_h\left(\frac{h}{L}\right) = 0,74 + 4,7\left(\frac{h}{L}\right). \quad (2.42)$$

Rýchlosť trenia u_* je daná ako:

$$u_* = \frac{k_v \times \bar{v}_0}{\ln\left(\frac{h}{hr}\right) - \psi_m}. \quad (2.43)$$

S funkciou vplyvu na hybnosť ψ_m získanú z:

$$\psi_m = \begin{cases} -5\left(\frac{h}{L}\right), & P > 0 \\ \ln\left[\left(\frac{1+y^2}{2}\right) \times \left(\frac{1+y}{2}\right)^2\right] - 2\arctang(y) + \frac{\pi}{2}, & y = \left[1 - 16\left(\frac{h}{L}\right)\right]^{\frac{1}{4}}, \quad P \leq 0 \end{cases} \quad (2.44)$$

Charakteristická teplota T_* je definovaná ako

$$T_* = \frac{-H}{c_\rho \times \rho \times u_*}. \quad (2.45)$$

V rovnici c_ρ je špecifické teplo pri konštantnom tlaku $1004 \text{ J/kg} \times K$, a ρ je atmosférická hustota v $\text{kg} \times \text{m}^{-3}$. Atmosférická hustota možno získať z $\rho = Pa/(2,9 \times T)$ kde Pa je atmosférický tlak v milibaroch a T je atmosférická teplota v stupňoch Kelvinoch obe merané (alebo odhadnuté) na výške h. [8]

Zo znalosti rýchlosti trenia u_* je možné odhadnúť koeficient turbulentnej výmeny pre teplo K_h :

$$K_h = \frac{k_v \times u_* \times h}{\phi_h\left(\frac{h}{L}\right)}. \quad (2.46)$$

Teraz je potrebné zvážiť atmosférický index lomu, ktorý pri optických frekvenciách závisí na atmosférickej teplote, tlaku, optickej vlnovej dĺžke, a špecifickej vlhkosti vzduchu. Pre optické frekvencie, vlhkosť suchej oblasti sa zvyčajne podieľa na fluktuácii indexu lomu menej ako 1% a je zvyčajne ignorovaný. Index lomu vzduchu je často písaný v tvare $n = \bar{n} + \Delta n$, kde priemerné hodnoty indexu lomu \bar{n} trocha väčší ako 1 a Δn predstavuje náhodnú odchýlku od tohto priemeru. Tieto odchýlky môžu byť odvodené od:

$$\Delta n = \frac{77,6 \times 10^{-6} Pa}{T} \times \left(1 + \frac{7,52 \times 10^{-3}}{\lambda^2} \right), \quad (2.47)$$

kde λ je vlnová dĺžka v mikrónoch. Pre štandardnú atmosférickú teplotu, tlak na hladine mora ($T = 288$ K, $Pa = 1013$ milibar) a vlnová dĺžka jedného mikrónu, zmena v indexe lomu Δn je v rádoch 3×10^{-4} .

Za predpokladu, že C_n^2 je prezentovaný funkciou potenciálnej teploty môžeme napísať:

$$C_n^2 = \frac{bK_h}{\varepsilon^{1/3}} \times \left(\frac{\partial n}{\partial h} \right)^2, \quad (2.48)$$

kde b je konštanta blížiac sa k 2,8.

Ignorovaním malého podielu z fluktuácii atmosférického tlaku môžeme rovnicu 2.47 s rešpektovaním potenciálnej teploty θ zapísať ako:

$$\frac{\partial n}{\partial \theta} = \frac{(-77,6 \times 10^{-6} \times Pa) \times (1 + 7,52 \times 10^{-3} \times \lambda^{-2})}{(\theta - 0,0098h)^2}. \quad (2.49)$$

Z reťazového pravidla:

$$\frac{\partial n}{\partial h} \approx \frac{\partial n}{\partial \theta} \times \frac{\partial \theta}{\partial h}. \quad (2.50)$$

Použitím rovnice 2.34 a ignorovaním malého príspevku v dôsledku vlnovej dĺžke dostaneme:

$$\frac{\partial n}{\partial h} \cong \frac{(-77,6 \times 10^{-6} \times Pa) \times T_* \times \phi_h \left(\frac{h}{L} \right)}{k_v \times h \times T^2}. \quad (2.51)$$

Týmto je dokončená sústava rovníc potrebných na odhad štrukturálneho parametru indexu lomu C_n^2 . [8]

Tabuľka 2.3: Hodnoty veľkosti drsnosti povrchu pre typické typy povrchu

Typ povrchu	Dĺžka drsnosti [cm]
Dedina	40
Mesto	55
Rezidencia s malou hustotou zástavby	108
Park	127
Kancelária	175
Hlavná obchodná oblasť	321
Rezidencia s hustou zástavbou	370
Tráva (5-6cm)	0,75
Dlhá tráva	3
Tráva (60-70)	11,4
Otvorené krovin	16
Obilie	22
Husté krovin	25
Vyrúbané lesy	32-48
Kukurica	74
Ihličnatý les	110
Citrusový sad	198
Jedľový les	283

2.7.1.2 Makro-úrovňový meteorologický model

Na rozdiel od predchádzajúcich modelov, predpovedanie hodnôt turbulencie týmto modelom je vykonané bez dlhého výpočtového algoritmu a bez niektorých meraných veličín (napríklad žiarenie, teplotná premenlivosť). Základ tohto modelu je postavený na čase, alebo relatívnej časti dňa a je pomerne spoľahlivý na predpovedanie štrukturálneho parametru indexu lomu $C_n^2 [m^{-2/3}]$. A vypočíta sa ako:

$$C_n^2 = 3,8 \times 10^{-14} \times W + f(T) + f(U) + f(RH) - 5,3 \times 10^{-13}, \quad (2.52)$$

kde:

$$f(T) = 2 \times 10^{-15} \times T, \quad (2.53)$$

$$f(U) = -2,5 \times 10^{-15} \times U + 1,2 \times 10^{-15} \times U^2 - 8,5 \times 10^{-15} \times U^3, \quad (2.54)$$

$$f(RH) = -2,8 \times 10^{-15} \times RH + 2,9 \times 10^{-17} \times RH^2 - 1,1 \times 10^{-15} \times RH^3. \quad (2.55)$$

V týchto rovniciach je W hodinová váha, T je teplota vzduchu [K], U je rýchlosť vetra [$m \times s^{-1}$] a RH je relatívna vlhkosť [%]. Tento model pre C_n^2 sa aplikuje približne na 15 m výšku, dynamický rozsah teploty je od 9 do 35°C, pre relatívnu vlhkosť od 14 do 92% a pre rýchlosť vetra od 0 do 10 [$m \times s^{-1}$]. Pre výšku inú ako 15 metrov, môžu byť predchádzajúce vypočítané hodnoty štruktúrneho parametru indexu lomu vzťahované k rôznym modelom výškového profilu C_n^2 . Hoci veľa modelov bolo navrhnutých a experimentálne popísaných pre merania nad výškou 100 m podporujú hlavne Tatarskiiho model, ktorý udáva:

$$C_n^2(h) = C_{n0}^2 \times h^{-4/3}, \quad (2.56)$$

kde C_{n0}^2 je štruktúrny parameter indexu lomu povrchu. Tento výškový profil nie je správny pre hraničnú úroveň kde C_n^2 náhle klesá s rýchlo stupajúcou výškou.

Rovnice 2.52 a 2.53 obsahujú 4 druhy regresívnych koeficientov (4 členy).

- Prvý člen v rovnici 2.52 je koeficient funkcie času, ktorá obsahuje informácie o slnečnom žiarení medzi východom a západom slnka (musí byť kladná).
- Druhý člen v rovnici 2.52 je koeficient teploty (definovaný v rovnici 2.53), ktorý by mal byť kladný, pretože vyššia teplota smeruje k väčšiemu teplotnému gradientu a teda k väčším turbulenciám.
- Tretí člen charakterizuje koeficienty rýchlosti vetra (definovaný v rovnici 2.54). Tieto koeficienty sa očakávajú záporné, pretože vplyv vetra spôsobuje miešanie vzduchu a preto znižuje nehomogenitu teploty a vlhkosti a teda znižuje C_n^2 . S rastúcou rýchlosťou vetra sa zvyšuje aj rozptýlenie teploty Zeme, čím sa taktiež znižuje teplotný gradient a C_n^2 .
- Posledný štvrtý člen v rovnici 2.52 udáva koeficient relatívnej vlhkosti. Veľká relatívna vlhkosť je závislá na gradientoch nízkej teploty a nízkej vlhkosti, a preto sú očakávané a použité negatívne hodnoty (rovnica 2.55).

Model definovaný v rovnici 2.52 je použiteľný nad púštym povrchom a povrchom s veľmi hustou vegetáciou. [10]

2.7.1.3 Rozšírenie makro-úrovňového meteorologického modelu

Makro-úrovňový meteorologický model (M-M model) predpovedá veľmi presné výsledky pre merania počas oboch častí dňa (denné hodiny, nočné hodiny), v ktorých údaje ako napríklad typ pôdy a vegetácie ovplyvňujú teplotný gradient a meranú vlhkosť, ktoré sú použité v modeli. Avšak, v predchádzajúcej kapitole boli uvedené obmedzenia tohto modelu pri výpočte štruktúrneho parametru indexu lomu C_n^2 , ako napríklad veľké hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu (>92%) a rýchlosti vetra (> 11 $m \times s^{-1}$).

Silný vietor má pozitívny vplyv na turbulencie, pretože ich znižuje. Vietor spôsobuje, že index lomu atmosféry je homogénny a tým znižuje gradient. Avšak vietor silnejší ako 7,7 $m \times s^{-1}$ neznižuje cirkuláciu vzduchu, ale skôr opačne zvyšuje turbulencie, tým že zvyšuje počet

častíc vo vzduchu (napríklad prach). Výsledkom je zvýšený útlm a rozptyl. Taktiež prispieva k absorpcii žiarenia aerosólmi a tým sa zvyšuje teplota atmosféry, čím rastie aj C_n^2 . Je všeobecne známe, že so zvyšujúcou sa relatívnou vlhkosťou dochádza degradácii rozlíšenia obrazu v dôsledku vplyvu turbulencie.

Štrukturálny parameter indexu lomu sa objavuje v mnohých vzorcoch, ktoré charakterizujú optické turbulencie. Základné vzorce C_n^2 zahŕňajú gradient skutočného indexu lomu ako koeficient, ktorý je priamou funkciou gradientov teploty a relatívnej vlhkosti. Zmeny vlhkosti v podmienkach s nízkou vlhkosťou spôsobujú náhodné zmeny indexu lomu. Teplota a vlhkosť sa líšia viac pri približovaní k zemi. Nasledujúce verzie M-M modelu, prezentované oddelene pre dennú časť dňa a nočnú časť dňa môžu rozšíriť tento model, tým že zahŕňajú vplyv vysokých rýchlostí vetra, vysokej relatívnej vlhkosti rovnako ako typ krajiny (A ako zemský činiteľ odrazu) a miestny čas. Experimentálne boli zistené, že tento rozšírený model je platný pre rozsah teploty 9-35°C výšku 2,5 m nad zemou.

Nasledujúce rovnice ukazujú predpoveď C_n^2 pre pobrežné oblasti v priebehu dňa, a platí pre hodnoty rýchlosti vetra $8 \text{ m} \times \text{s}^{-1} \leq U \leq 17 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$ a relatívnu vlhkosť $30\% \leq RH \leq 70\%$. Nasledujúca rovnica zobrazuje výpočet C_n^2 pre tieto podmienky:

$$C_n^2 = 3,8 \times 10^{-14} \times W + \frac{A}{\exp(T)} \times 10^{-4} + f(U) + f(RH) - 4,45 \times 10^{-14}, \quad (2.57)$$

kde pre skalnatú krajinu (skalnatá púšť) sú funkcie ako:

$$f(U) = 8 \times 10^{-16} \times U - 4 \times 10^{-18} \times U^2, \quad (2.58)$$

$$f(RH) = -8 \times 10^{-16} \times RH + 5 \times 10^{-18} \times RH^2. \quad (2.59)$$

Pre krajinu pokrytú vegetáciou platí:

$$f(U) = 2,58 \times 10^{-14} \times U, \quad (2.60)$$

$$f(RH) = -6,797 \times 10^{-15} \times RH, \quad (2.61)$$

kde W je dočasná hodinová váha, A je hodnota zemského činiteľa odrazu, T je teplota vzduchu [°C], U je rýchlosť vetra [$\text{m} \times \text{s}^{-1}$] a RH je relatívna vlhkosť vzduchu [%]. Počas nočnej časti dňa, je predpoveď turbulentného parametru nad krajinou ukázaný v rovniciach 2.60 a 2.61, ktoré platia pre rýchlosť vetra $5 \text{ m} \times \text{s}^{-1} \leq U \leq 10 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$ a pre vysoké hodnoty relatívnej vlhkosti $92\% \leq RH \leq 100\%$. Tieto vzorce sú prijateľné len pre pobrežnú oblasť pokrytú vegetáciou. V inom prípade platí:

$$C_n^2 = f(T) + f(U) + f(RH) - 1,9 \times 10^{-14}, \quad (2.62)$$

kde

$$f(T) = 3 \times 10^{-17} \times T, \quad (2.63)$$

$$f(U) = 1,2 \times 10^{-14} \times U, \quad (2.64)$$

$$f(RH) = -7,5 \times 10^{-16} \times RH. \quad (2.65)$$

Tento posledný model (eM-M) rozširuje meteorologický model bez použitia miestneho času a činiteľa odrazu, pretože v nočnej časti dňa pre vysoké hodnoty relatívnej vlhkosti a rýchlosti vetra nehrajú tieto parametre hlavnú úlohu. [10]

2.7.2 Medzná vrstva

V medznej vrstve sa používa model, ktorý vytvoril Kaimal a označuje sa ako KM model. Model určuje vertikálnu zmenu C_T^2 a k prevedeniu na C_n^2 využíva už spomínanú rovnicu 2.22, ktorá zahrňuje teplotu a tlak atmosféry. Potom bude KM model vyjadrený ako:

$$\frac{C_T^2(h)}{C_T^2(h_0)} = \begin{cases} \left[\frac{h}{h_0}\right]^{-4/3} & 0 < h < 0,5 \times h_i \\ \left[\frac{h_i/2}{h_0}\right]^{-4/3} & 0,5 \times h_i < h < 0,7 \times h_i, \\ \left[\frac{h_i/2}{h_0}\right]^{-4/3} \times \left[\frac{h}{0,7 \times h_i}\right]^3 & 0,7 \times h_i < h < 1 \times h_i \end{cases} \quad (2.66)$$

kde h_i [m] predstavuje výšku inverznej vrstvy nad úrovňou mora. Pre oblasť Moravy je typická nadmorská výška, pri ktorej dochádza k inverzii medzi 1 až 2 km. Tento model má dobré výsledky pre púštne oblasti v priebehu denných hodín.[3]

2.7.3 Vyššia vrstva

Vyššiu vrstvu troposféry je možné popísať pomocou Hufnagel-Valleyov modelu, ktorý je:

$$C_n^2(h) = 0,00594 \times \left(\frac{U}{27}\right)^2 \times (10^{-5}h)^{10} \times e^{\left(\frac{-h}{1000}\right)} + 2,7 \times 10^{-16} \times e^{\left(\frac{-h}{1500}\right)} + A \times e^{\left(\frac{-h}{100}\right)}, \quad (2.67)$$

kde h [km] je nadmorská výška [km], $U[m \times s^{-1}]$ je rýchlosť vetra definovaná ako stredná hodnota rýchlosti vetra v rozmedzí 5 až 20 km a parameter $A [m^{-2/3}]$ je nominálna hodnota $C_n^2(0)$.

Ďalej sa používaj denný/nočný SLC model. Tento model popisuje po častiach spojitý profil C_n^2 v rozmedzí 3 až 20 km nadmorskej výšky.

Denný SLC model je popísaný ako:

$$C_n^2(h) = \begin{cases} 1,7 \times 10^{-14} & 0 < h < 18,5 \text{ km} \\ 3,13 \times 10^{-13} \times h^{-1,05} & 18,5 < h < 240 \\ 1,3 \times 10^{-15} & 240 < h < 880 \\ 8,87 \times 10^{-7} \times h^{-3} & 880 < h < 7200 \\ 2 \times 10^{-16} \times h^{-1/2} & 7200 < h < 20000 \end{cases} \quad (2.68)$$

Nočný SLC model je popísaný ako:

$$C_n^2(h) = \begin{cases} 8,4 \times 10^{-15} & 0 < h < 18,5 \\ 2,87 \times 10^{-12} \times h^{-2} & 18,5 < h < 110 \\ 2,5 \times 10^{-16} & 110 < h < 1500 \\ 8,87 \times 10^{-7} \times h^{-3} & 1500 < h < 7200 \\ 2 \times 10^{-16} \times h^{-1/2} & 7200 < h < 20000 \end{cases} \quad (2.69)$$

Z týchto modelov boli vyvinuté ďalšie modely napríklad CLEAR I nočný a AMOS. [3]

Tabuľka 2.4: Hodnoty štruktúrneho indexu lomu pre rôzne turbulencie[3]

Turbulencie	Hodnoty $C_n^2 [m^{-2/3}]$
Extrémna	10^{-12}
Veľmi silná turbulencia	10^{-13}
Silná turbulencia	10^{-14}
Stredná turbulencia	10^{-15}
Slabá turbulencia	10^{-16}
Zanedbateľná	10^{-16}

2.8 Putovanie lúča

Pre lúč v prítomnosti veľkých buniek turbulencie v porovnaní s priemerom lúča môže byť použitá geometrická optika k popisu radiálneho rozptylu σ_r ako funkcia vlnovej dĺžky, vzdialenosti L a štruktúrneho parametru indexu lomu C_n^2 takto:

$$\sigma_r = 1,83 \times C_n^2 \times \lambda^{-1/6} \times L^{17/6}. \quad (2.70)$$

Tento vzťah ukazuje, že dlhšie vlnové dĺžky lúča budú mať menšie putovanie lúča ako kratšie vlnové dĺžky, hoci závislosť vlnovej dĺžky je slabá. I keď je udržiavaný úzky lúč na trase môže byť problém, lebo miera fluktuácie je pomalá (pod kHz), takže môže byť použité sledovanie systému.[2]

2.9 Scintilácia

Bežný jav, ktorý vyzerá ako jazero uprostred horúceho asfaltu, môžeme pomenovať ako stintilačný účinok. Z troch efektov turbulencie, môžu byť FSO najviac ovplyvnené práve stintiláciou. Náhodná interferencia s čelom vlny môže vyústiť do maxim a minim úrovné signálu, čo môže mať za následok saturáciu prijímača alebo stratu signálu.

Veľká časť použitia FSO systémov, ako sú linka Zem - satelit, kde môže byť väčšina scintilácie spôsobená v blízkosti Zemskeho povrchu. FSO systémy pracujú horizontálne v atmosfére v blízkosti povrchu, kde dochádza k maximálnej nožnej scitilácie. Scintilačné

efekty pre malé kolísanie sledujeme log-normal rozdelením, vyznačujúci sa rozptylom σ_i , pre rovinné vlny daný ako:

$$\sigma_i = 1,23 \times C_n^2 \times k^{7/6} \times L^{11/6}, \quad (2.671)$$

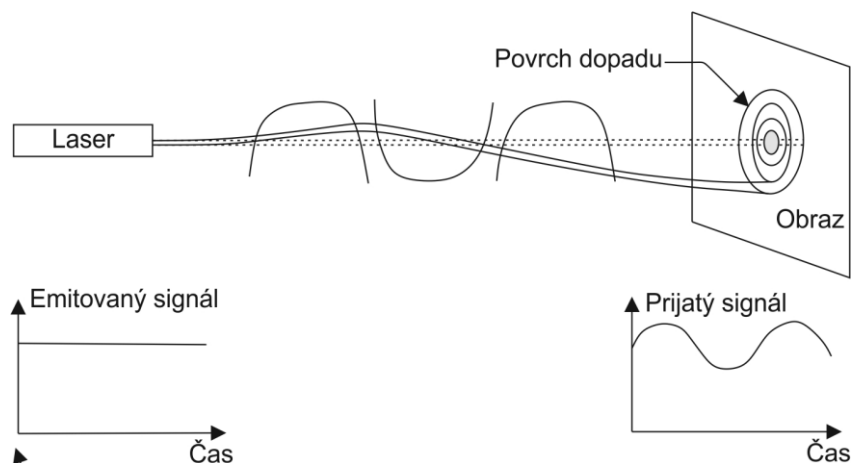
kde $k = 2\pi/\lambda$. Tento vzorec ukazuje, že väčšie vlnové dĺžky prenosu môžu mať menší rozptyl, všetky ostatné faktory ostávajú rovnaké. U FSO systémov s úzkym, mierne sa rozbiehavým lúčom, je pojem rovinné vlny vhodnejší ako pri sférickom lúči. Dokonca aj v prípade, že je predná vlna zakrivená, keď sa dostane na detektor, vysielač lúč je oveľa väčší ako detektor.

Vzorec pre rozptyl s veľkým kolísaním je daný ako:

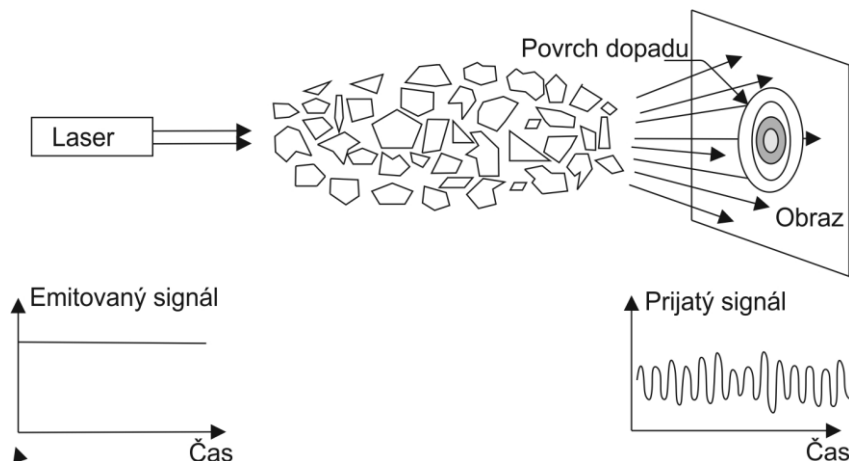
$$\sigma_{high}^2 = 1 + 0,86 \times (\sigma^2)^{-2/5}. \quad (2.72)$$

Čo naznačuje, že kratšie vlnové dĺžky majú menší rozptyl. Pri FSO nasadení, musí byť dráha lúča viac ako 5 m nad mestskými ulicami. [2]

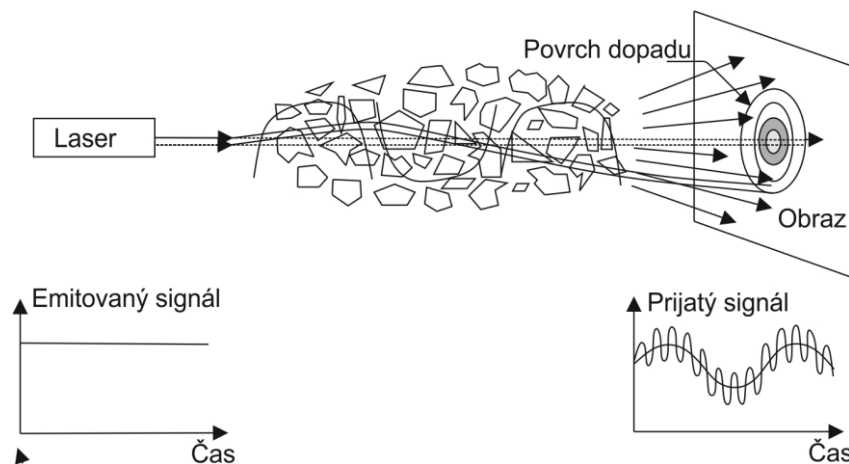
Amplitúda a frekvencia scintilácie závisí na veľkosti buniek v porovnaní s priemerom lúča. Nasledujúce obrázky znázorňujú tento efekt, rôzne variácie amplitúdy, frekvencie na prijímanom signáli. Keď sú heterogenity veľké v porovnaní s čelom lúča dochádza k vychýleniu lúča (obrázok 2.8), ak sú malé, čelo lúča je rozšírené (obrázok 2.9). Pri heterogenitách rôznej veľkosti dochádza k scintilácii (obrázok 2.10). [5]



Obrázok 2.8: Vychýlenie lúča pod vplyvom turbulentných buniek väčších ako priemer lúča[5]



Obrázok 2.9: Vychýlenie lúča pod vplyvom turbulentných buniek menších ako priemer lúča[5]



Obrázok 2.10: Vplyv rôznych veľkosti heterogenít na šírenie laserového lúča (scintilácia) [5]

2.10 Šírenie lúča

Veľkosť lúča môže byť charakterizovaný efektívnym polomerom na vzdialenosti od stredu lúča ($z = 0$), kde sa relatívna intenzita zníži o $1/e$. Efektívny polomer je daný nasledovne:

$$a_t = 2,01 \times \left(\lambda^{-1/5} \times C_n^{6/5} \times z^{8/5} \right). \quad (2.73)$$

Závislosť vlnovej dĺžky na šírení lúča nie je silná. Veľkosť miesta môžeme často pozorovať, ako dvojnásobok priemeru difrakčne-limitovaného lúča. Veľa FSO systémov používajú 1 m lúča na kilometer vzdialenosti. V dokonalých podmienkach bez vplyvu životného prostredia by pre lúč bola limitujúca len vzdialenosť. [2]

2.11 Vplyv počasia

Predchádzajúce kapitoly boli skôr teoretického charakteru. Jedným z praktických tém pre projektantov a realizátorov FSO systémov je počasie, ktoré výrazne vplyva na aplikácie FSO spojov.

2.11.1 Dážď

Dážď má vplyv na FSO tým, že znižuje dosah spojenia, i keď jeho vplyv je podstate menší ako u hmly. Tento menší vplyv je spôsobený tým, že polomer kvapiek (200-2000 μm) je podstate väčší, ako je typicky používaná vlnová dĺžka prenosu vo FSO systéme. [2]

Z čoho vyplýva, že koeficient rozptylu pre dážď závisí na veľkosti dažďovej kvapky a jeho distribúcia je definovaná ako

$$\beta_{\text{dážď}} = 1,25 \times 10^{-16} \times (\Delta x / x t) / a^2 \text{ cm}^{-1}, \quad (2.74)$$

kde a je parameter, ktorý charakterizuje veľkosť rozloženia dažďovej kvapky a $\Delta x / \Delta t$ je miera dažďa.

Útlm spôsobený dažďom je definovaný ako:

$$\infty_{\text{dážď}} = 1,076 \times R_{pr}^{0,67} [\text{dB} \times \text{km}^{-1}], \quad (2.75)$$

kde R_{pr} je rýchlosť zrážok [6].

Typické hodnoty útlmu spôsobeného dažďom majú miernu povahu. Napríklad pre zrážky 2,5 cm/hodinu je útlm signálu 6 dB/km. Preto komerčne dostupne FSO systémy, ktoré operujú s 25 dB linkou môže signál prejsť dažďom relatívne nerušené. To je v prípade, keď sú systémy rozmiestnené v mestských oblastiach, kde sú vzdialenosti zvyčajne menšie ako 1 km. Ak je systém nasadený do vzdialenosti 500 metrov za rovnakých podmienok, útlm spôsobený dažďom je len 3 dB/km. Avšak, keď sa rýchlosť dažďa dramaticky zvyšuje až nad úroveň prietrz mračen (>10 cm/hodinu), sa môže útlm spôsobený dažďom stať problémom, tým že zníži dosah spojenia. Ale tieto druhy prietrz mračen trvajú len krátku dobu (rádovo v minútach).

Zaujímavé je, že bezdrôtové technológie RF, ktoré používajú frekvencie približne nad 10 GHz sú nepriaznivo ovplyvňované dažďom ale odolné voči vplyvu hmly. To z dôvodu, že RF vlnové dĺžky sú viac ovplyvňované väčšími polomermi kvapiek v daždi, ako menšími kvapkami, z ktorých sa skladá hmla. Nižšie nelicencované RF frekvencie v pásme 2,4 GHz a 5,8 GHz sú relatívne neovplyvniteľné dažďom, ale vykazujú riziko značného rušenia, z dôvodu nedostatku licencií v týchto oblastiach. [2]

2.11.2 Sneh

Snehové vločky sú vlastne kryštály, ktoré sú rôznych tvaroch a veľkostí. Zvyčajne má sneh priemer ako kvapky dažďa. Podmienky pri snežení môžu zmierniť lúč, ale lúč nemá tendenciu mať veľký problém vo FSO systéme, pretože veľkosť vločky sú veľké v porovnaní

s používanou vlnovou dĺžkou. Dopad od mierneho snehu až po snehové víchrice spadá niekde medzi dážď a strednú hmlu s útlmom spojenia od 3dB/km po 30 dB/km. [2]

2.11.3 Hmla

Hmla ma najväčší vplyv zo všetkých javov počasia, pretože sa skladá z malých kvapiek vody s polomerom o veľkosti blízkej IR vlnovej dĺžky. Distribúcia veľkosti častíc sa líši pre rôzne stupne hmly. Poveternostné podmienky sú označované ako hmla zvyčajne, keď sa dohľadnosť pohybuje do 2000 metrov. Vzhľadom k tomu, je hmlu ťažké popísať fyzikálnymi prostriedkami. Niekedy sa hmla charakterizuje ako hustá alebo riedka. Ak je dohľadnosť viac ako 2000 m sú podmienky označované ako hmlisté.

Tabuľka 2.5 ukazuje viditeľnosť pre rôzne podmienky hmly. Rozptyl je dominantný pre straty spôsobené hmlou. Dokonca aj mierne podmienky hmly môžu veľmi zoslabiť IR signály na kratšie vzdialenosti. Očakávaný vývoj útlmu v dB/km a jeho porovnanie s viditeľnosťou je uvedený v tabuľke. Tabuľka jasne ukazuje, že dážď má oveľa menší vplyv na straty FSO systému v porovnaní s hmlou. Taktiež by sme mohli porovnávať stredné zrážky s menším útlmom s riedkou hmlou.

Tabuľka 2.5: Viditeľnosť pre jednotlivé typy hmly a zrážok

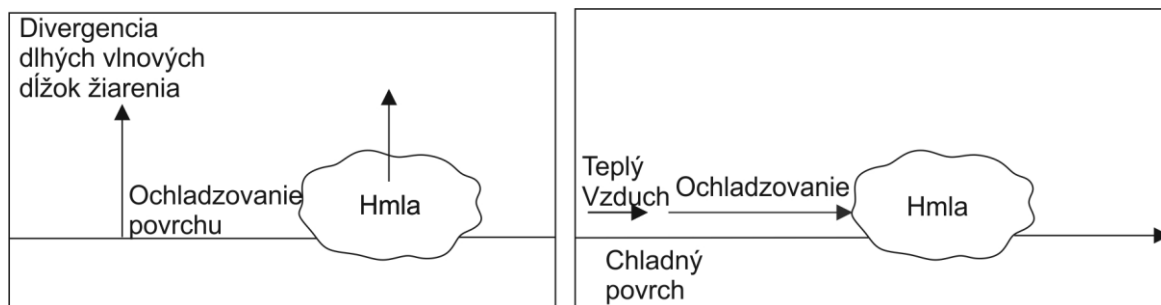
Meteorologické podmienky	Zrážky		Množstvo [mm/h]	Viditeľnosť	Straty [dB/km]
Veľmi hustá hmla				0 m, 50 m	-271,65
Hustá hmla				200 m	-59,57
Mierna hmla	Sneh			500 m	-20,99
Ľahká hmla	Sneh	Prietrž mračien	100	770 m 1 km	-12,65 -9,26
Riedka hmla	Sneh	Silný dážď	25	1,9 km 2 km	-4,22 -3,96
Opar	Sneh	Priemerný dážď	12,5	2,8 km 4 km	-2,58 -1,62
Ľahký opar	Sneh	Slabý dážď	2,5	5,9 km 10 km	-0,96 -0,44
Jasno	Sneh	Mrholenie	0,25	18,1 km 20 km	-0,24 -0,22
Veľmi jasno				23 km	-0,19
				50 km	-0,06

Aj keď sa viditeľnosť najčastejšie používa pre charakterizovanie hmly boli vykonané aj ďalšie metódy, ako je meranie veľkosti a hustoty častíc. FSO komunita používa hlavne dáta viditeľnosti, pretože tieto merania boli prijaté na veľkých letiskách po mnoho desaťročí. Do istej miery tieto merania umožňujú charakterizovať rôzne regióny a získavať štatistické údaje dostupnosti FSO systémov. Avšak, väčšina údajov bola priemerná hodnota po rokoch. Preto všeobecne platí, že časové rozlíšenie týchto dátových bodov nie je moc presné.

Vzhľadom k tomu, že mikroklimatické prostredia, ako sú rybníky alebo rieky môžu vyvolávať hmlisté podmienky, a teda údaje získané na letiskách nie sú spoľahlivé pre okolité časti, ale bolo ukázané, že viditeľnosť na letiskách sa často používa ako dobrý odhad pre minimálne očakávanie dostupnosti. To je preto, lebo obvykle sa letisko nachádza mimo metropolitnej hranice, a mikroklima vo vnútri mesta typicky vytvára menej hmly. Rozdelenie hustoty častíc hmly sa môže taktiež meniť s nadmorskou výškou, čo činí modelovanie hmly ešte zložitejším javom. [2]

V literatúre nájdeme 2 typy hmly a to konvektívnu a advektívnu (pobrežnú) hmlu. Konvektívna hmla sa vytvára v dôsledku ochladzovania žiarením. Táto hmla vzniká, keď je vzduch dostatočne chladný a nasýtený. Hlavne v noci a na konci dňa s veľkosťou častíc 1 až 3 μm a s obsahom vody medzi 0,01 a 0,1 g/m^3 . Toto ovplyvňuje kratšie vlnové dĺžky (prvé a druhé prenosové okno). Spoločný rozsah viditeľnosti pre tento typ hmly je 550 m.

Ďalší typ hmly je pobrežná hmla taktiež nazývaná aj ako advektívna hmla (advekcia-prenos tepla prúdením), vzniká pohybom mokrej a teplej hmoty vzduchu nad chladnejšími pobrežnými alebo pozemnými plôch. Táto hmla je charakterizovaná obsahom kvapalnej vody vyššieho ako 0,20 g/m^3 a pre priemer častíc v blízkosti do 20 μm . Viditeľnosť pri tejto hmla je 200 metrov.



Obrázok 2.11: Konvektívna hmla (vľavo), advektívna hmla (vpravo) [6]

Vplyv hmly na FSO systémy môže byť popísaný empirickými a teoretickými postupmi.

- Teoretický postup: za predpokladu, že tvar častíc je guľovitý, predovšetkým tie, ktoré tvoria hmlu, môže byť použitý presný Mieov teorém na meranie rozptylu C_s absorpcie C_a a prierezu častíc. Tento prierez častíc je definovaný ako:

$$C_s = \frac{P_s}{I_o}, \quad (2.76)$$

$$C_a = \frac{P_a}{I_o}, \quad (2.77)$$

kde $P_s(W)$ je elektromagnetická energia rozptýlená po povrchu imaginárnej gule na časticiach, $P_a(W)$ je elektromagnetická energia absorbovaná na povrchu imaginárnej gule a $I_o (W/m^2)$ je intenzita dopadajúceho žiarenia. V praxi, pri použitých vlnových dĺžkach vo FSO (0,69, 0,85 a 1,55 μm) je molekulárna absorpcia zanedbateľná ($C_a \sim 0$). Známym C_s , môžeme odhadnúť hodnotu normalizovaného prierezu alebo účinnosť rozptylu definovanú ako:

$$Q_s = \frac{C_s}{\pi \times r \times x_p^2}, \quad (2.78)$$

Q_s je funkcia parametru veľkosti $x_0 = 2\pi r_p / \lambda$, bezrozmerná veličina s maximálnou hodnotou 3,8 v r_p / λ (maximálny rozptyl optického signálu).

Avšak, veľkosť častíc hmly sa líši v atmosfére podľa polohy. Na základe týchto predpokladov, že rozptýlené svetlo má rovnakú vlnovú dĺžku ako dopadajúce svetlo a, že existuje len jediný rozptyl a viac rozptylové účinky sú zanedbateľné, častice majú guľovitý tvar a pôsobia samostatne s komplexným indexom lomu v priestore bol výraz pre Mieov rozptyl odvodený ako:

$$\gamma_t(\lambda) \cong \beta_a(\lambda) = 10^5 \int_0^\infty Q_s \left(\frac{2\pi \times r_p}{\lambda} \right) \times \pi \times r^2 \times n(r_p) dr_p, \quad (2.79)$$

kde n_r je reálna časť komplexného indexu lomu a $n(r_p)$ je objemová koncentrácia (počet častíc na jednotku objemu). $\beta_a(\lambda)$ je absorpcia (špecifický útlm) meraná v dB/km a definovaná ako:

$$\beta_a = C_1 \lambda^{-\delta}, \quad (2.80)$$

C_1 a δ sú parametre týkajúce sa distribúciou častíc a viditeľnosti, λ je operačná vlnová dĺžka, β možno vypočítať sčítaním útlmov všetkých čiastočiek hmly na jednotku objemu, C_1 sa vzťahuje k viditeľnému rozsahu (viditeľnosti) V z Kimovho modelu:

$$C_1 = \frac{3,91}{V} \times (0,55)^\delta, \quad (2.81)$$

kde viditeľný rozsah je 550 nm. $n(r_p)$ je veľmi dôležitý parameter, a môže byť považovaný za kľúčový parameter na určenie fyzikálnych a optických vlastností častíc, vrátane hmly. Vzhľadom k tomu, že hmľa sa skladá z nahromadených malých vodných častíc so špecifickými veľkosťami kvapiek, účinok jednotlivých kvapiek musí byť prepočítaný na jednotku objemu za predpokladu, že nedochádza k interakciám medzi sférami (viacnásobný rozptyl je zanedbateľný). Všeobecne platí, že táto distribúcia je reprezentovaná analytickou funkciou ako je log-normal rozdelenie pre aerosóly a modifikované gama rozdelenie pre hmľu. Ten sa ďalej používa pre modelovanie rôznych typov hmly a mrakov. Počet častíc na jednotku objemu je daný ako:

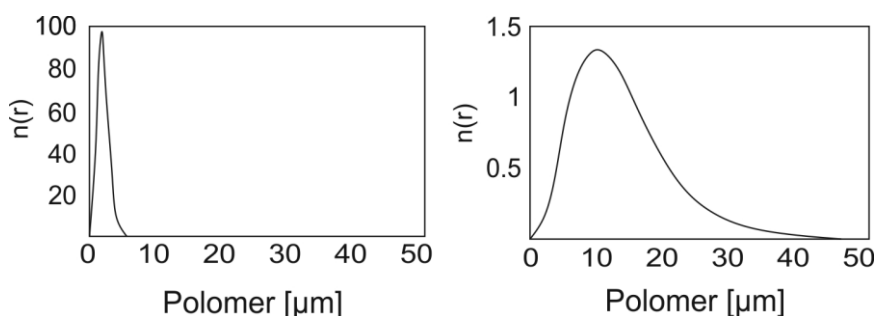
$$n(r_p) = a \times r_p^\alpha \times \exp(-br_p), \quad (2.82)$$

α , a , b sú parametre, ktoré charakterizujú rozdelenie advektívnej a konvektívnej hmly zobrazených v tabuľke 2.6.

Tabuľka 2.6: Rozdelenie veľkostí častíc pre rôzne typy hmly

Typ hmly	α	a	b	$N(\text{počet/cm}^3)$	$W(\text{g/m}^3)$	$r_m(\mu\text{m})$	$V(\text{m})$
Hustá advektívna hmla	3	0,027	0,3	20	0,37	10	130
Mierna konvektívna hmla	6	607,5	3	200	0,02	2	450

Použitím rovnice 2.80 dostaneme rozloženie veľkostí častíc advektívnej a konvektívnej hmly, ktoré je zobrazené na obrázku 2.12.



Obrázok 2.12: Rozloženie veľkostí častíc oproti priemeru častíc (μm): (a) advektívna hmla, (b) konvektívna hmla[6]

- Empirický postup: Útlm v dôsledku hmly závisí od faktorov ako je poloha, rozloženie veľkostí častíc, obsah kvapalnej vody a priemerný priemer častíc. Keďže, koncentrácia častíc a rozloženie veľkostí častíc je rozdielna z jedného miesta na druhé je úloha predpovedania útlmu spôsobeného hmlou náročná. Vo všeobecnosti platí, že rozloženie veľkostí častíc hmly nie je k dispozícii a nie je zaznamenané v štandardných meteorologických dátach. Preto je útlm optického signálu spôsobený hmlou iba predpovedaný použitím empirickými modelmi odvodených od experimentálneho pozorovania. Empirické modely používajú viditeľnosť V na charakterizovanie hustoty hmly. [6]

Meteorologická viditeľnosť je použitá na meranie útlmu spôsobeného hmlou. Veľmi zásadný zákon na meranie hustoty hmly na základe viditeľnosti je Koschmiederov zákon. Tento zákon definuje viditeľnosť ako vzdialenosť k objektu, pri ktorej priepustnosť klesne na nejakú určitú prahovú hodnotu z pôvodného viditeľného kontrastu (100%) pozdĺž trasy. Meteorologická viditeľnosť V (km) môže byť vyjadrená v podmienkach koeficientu atmosférického útlmu β_λ a T_{th} ako:

$$V = \frac{10 \log(T_{th})}{\beta_\lambda}. \quad (2.83)$$

T_{th} sa mení od 0,0077 do 0,06, kde menšia hodnota definuje väčšiu meteorologickú viditeľnosť pre istú oblasť atmosféry.

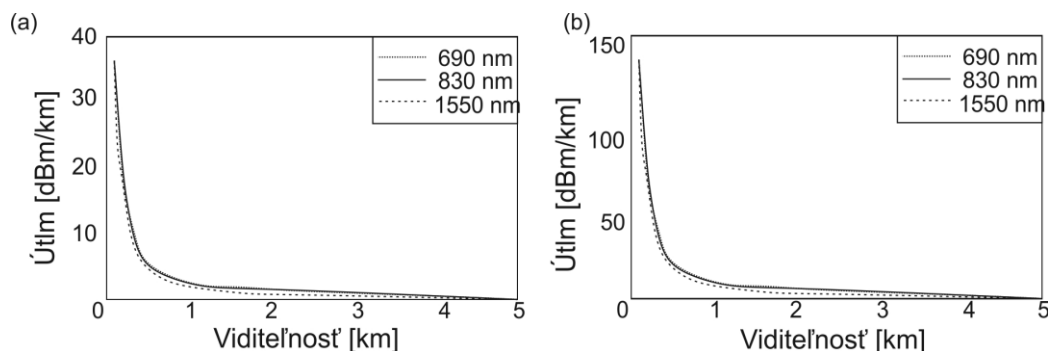
V roku 1924, Koschmieder definoval hodnotu pre T_{th} z 2 % odvodenú z Helmholtzovho teorému. Avšak, T_{th} je považovaná za 5 % pre letecké požiadavky ako kontrast objektu, vzhľadom k okoliu je omnoho menší ako objekt oproti obzoru. Rozptylový koeficient hmly je závislý na vlnovej dĺžke šíreného optického zväzku a meteorologickej viditeľnosti V . Model vyvinutý Kruseom prepája spolu tieto parametre ako:

$$V(km) = \frac{10 \log_{10} T_{th}}{\beta_\lambda} \times \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\delta}, \quad (2.84)$$

λ_0 je maximálne spektrum slnečného pásma, δ je koeficient veľkostí častíc a jeho hodnoty sú dané ako:

$$\delta = \begin{cases} 1,6 & \text{pre } V > 6 \text{ km} \\ 1,3 & \text{pre } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,585 \times V^{1/3} & \text{pre } 0 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \end{cases}. \quad (2.85)$$

Obrázky 2.13a a 2.13b zobrazujú útlmový koeficient atmosféry β_λ oproti viditeľnosti pre rozsah vlnových dĺžok použitých použitím Kruseho modelu pre T_{th} 2 a 5%. Obrázok 2.13a pre V 500 m je na vlnových dĺžkach 0,69 a 1,55 μm útlmový rozdiel zvýšený z 10 dB na 28 dB pre hustú hmlu a V 100 metrov. Obrázok 2.13b s $T_{th} = 5\%$, útlmový rozdiel z 4 dB pre V 500 m zvýšený na 28 dB pre V 100 metrov. Kruseho model bol pôvodne vyvinutý pre hustý opar, a nie je príliš vhodný pre štúdium vplyvu hmly pri meteorologickej viditeľnosti 1 km.



Obrázok 2.13: Útlm vs viditeľnosť použitím Kruseho modelu pre (a) $T_{th} = 2\%$ a (b) pre $T_{th} = 5\%$

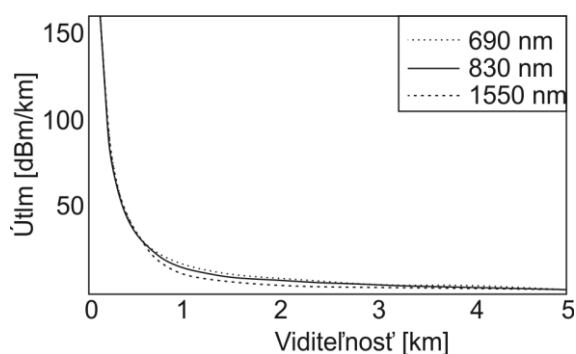
Ďalšie štúdie na základe empirických dát v oblasti $V < 1$ km naznačujú, že β je vlnová dĺžka nezávislá pre $V < 0,5$ km. To viedlo ku Kimovmu modelu, ktorý udáva hodnoty δ ako:

$$\delta = \begin{cases} 1,6 & \text{pre } V > 50 \text{ km} \\ 1,3 & \text{pre } 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ 0,16V + 0,34 & \text{pre } 1 \text{ km} < V < 6 \text{ km} \\ V - 0,5 & \text{pre } 0,5 \text{ km} < V < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{pre } V < 0,5 \text{ km} \end{cases} \quad (2.86)$$

Hodnoty rozsahu viditeľnosti za rôznych poveternostných podmienok sú uvedené v tabuľke 2.7, pričom obrázok 2.14 zobrazuje hodnoty útlmového koeficientu na základe Kimovho modelu oproti vlnovej dĺžke z rozsahu vlnových dĺžok. Podľa tohto modelu použitie kratších vlnových dĺžok od miernej po hustú hmlu neponúka žiadnu výhodu pre FSO spoj, pretože útlmový koeficient je v tých podmienkach nezávislý na vlnovej dĺžke. Ďalšia práca na teoretickom i praktickom skúmaní tohto modelu pre malú viditeľnosť potvrdzuje, že útlm je skutočne nezávislý na vlnovej dĺžke pri podmienkach stredne hustej až hustej hmly z Kimovho modelu a bol odvodený z Mieho teorému. [6] [9]

Tabuľka 2.7: Viditeľnosť pre rôzne meteorologické podmienky

Meteorologické podmienky	Viditeľnosť (m)
Hustá hmla	200
Mierna hmla	500
Jemná hmla	770-1000
Riedka hmla/ prudký dážď	1900-2000
Opar/ dážď	2800-40000
Jasno/mrholenie	18000-20000
Veľmi jasno	23000-50000



Obrázok 2.14: Kimov model pre viditeľnosť T_{th} 2% a rozsah vlnových dĺžok. [6]

2.12 Priama viditeľnosť (LoS)

Systém FSO vyžaduje priamu viditeľnosť (LoS). Priama viditeľnosť znamená, že vysielateľ a prijímač je vidieť na oboch stranách. Vzhľadom k tomu, IR lúče sa propagujú a rozširujú lineárne, kritéria priamej viditeľnosti je miernejší v porovnaní s mikrovlnnými systémami, ktoré vyžadujú ďalšie cesty pre rozšírenie Fresnelovej zóny. [2]

2.12.1 Určenie LoS

Najjednoduchší spôsob ako zistiť, či existuje priama viditeľnosť medzi dvoma vzdialenými miestami je vizuálne pozorovanie. Pre vzdialenosti, ktoré sú dlhšie ako jeden kilometer, môže byť určenie náročnejšie. Ďalekohľady a teleskopické šošovky v tomto scenári môžu byť nevyhnutné. Mnoho FSO predajcov začlenilo zameriavací ďalekohľad do FSO systémov na vykonávanie úlohy zameriavania. Niektoré organizácie uprednostňujú používanie sofistikovanejších GIS máp za účelom zistenia prístupu. Existujú rôzni dodávatelia pre mapovanie GIS pomocou softvéru. Programy môžu načítat mapy vo vysokom rozlíšení v trojrozmerných topológiach. Tieto mapy obsahujú informácie o budovách a ich špecifické umiestnenie. Čo nám umožňuje pre stanovenie, či existuje priama viditeľnosť medzi dvoma FSO systémami.

Hoci spoj zo strechy na strechu je jeden z viacerých scenárov nasadenia FSO systémov, je možné nájsť aj spoje v domoch za oknami, keď nie je k dispozícii spoj na strechu. Je však nutné dbať na to, aby sme určili či je možné dosiahnutie priamej viditeľnosti. Okrem toho, uhol lúča s oknom je kritický. Uhol by mal byť čo najkolmejší ako je to možné, vychýlenie už o 5 stupňov znižuje naviazanie lúča. V určitom uhle sa už žiadne svetlo nenaviazá vôbec.

Kompletný vnútorný odraz je to čo drží svetlo vo vnútri optických vláknach. Väčšina okien obsahujú sklo alebo sklenené povlaky, ktoré znižujú jas. Pretože tieto okná sú často špeciálne navrhnuté tak aby neprepúšťali infračervené svetlo, môžu povlaky redukovať signál o 60 % alebo viac. Niekedy je okenný variant lepší, keďže nemusíme vždy dostať strešné práva. Zníženie vzdialenosti spoja (čo zvyšuje výkon signálu na prijímacej strane) alebo rastúca intenzita lúča môže tento problém často vyriešiť. [2]

2.12.2 Viditeľnosť

Nízka viditeľnosť znižuje účinnosť a dostupnosť FSO systémov. Niektoré miesta majú nižšiu priemernú viditeľnosť. To znamená, že v rovnakej vzdialenosti, rovnaký systém FSO bude mať inú dostupnosť ako v inom meste. Nízka viditeľnosť sa môže vyskytovať len v určitom časovom období (počas roka alebo dňa). Najmä v pobrežných oblastiach sa vyskytujú javy ako hmla. Jedným z riešení negatívneho dopadu zníženia viditeľnosti je skrátiť vzdialenosť medzi FSO terminálmi. Redundantná cesta môže zlepšiť dostupnosť v prípade, že viditeľnosť je obmedzená na miestnu úroveň, ako napríklad hmla pri rybníku, rieke alebo výfukové plyny na vrchole strechy.

Nízka viditeľnosť a vysoké rozptylové koeficienty sú najviac limitujúce faktory pre nasadenie FSO systémov na dlhé vzdialenosti. [2]

2.12.3 Vzďialenosť

Vzďialenosť ovplyvňuje funkciu FSO systémov v 3 smeroch. Po prvé, aj za jasného počasia, dochádza k odchyľovaniu lúča a tým detektor prijíma menej energie. U kruhového lúča sa geometrické straty na trase zvyšujú o 6 dB, ak sa vzďialenosť zvyšuje o faktor 2. Za druhé, celkové prenosové straty lúča sa zvyšujú s rastúcou vzďialenosťou. Po tretie, účinky scintilácie sa hromadia na dlhšej vzďialenosti, čo spôsobuje, že hodnota pre scintilačný rozsah v celkovom výkone zvyšuje udržiavanú preddefinovanú hodnotu BER.

Väčšina komerčne dostupných FSO systémov je určená pre prevádzku systému medzi 25 a 5000 metrov. Pre vojenské a satelitné účely s použitým vysokým výkonom je možné dosiahnuť až 2000 km. Na zmiernenie problémov so vzďialenosťou je do systému možné začleniť 3 alebo viac paralelne pracujúcich laserov. Je zaujímavé, že prostredí kde je samé vákuum možno dosiahnuť vzďialenosti až tisíce kilometrov. [2]

2.13 Šírka pásma

V bežných FSO systémoch sú dva prvky, ktoré obmedzujú šírku prenosového pásma celého systému. K týmto prvkom patrí zdroj prenosu a detektor. Ak sú LED diódy začlenené do systémov FSO je šírka pásma obmedzená obvykle na 155 Mbit.s^{-1} . Ak sú použité laserové zdroje môžu byť rýchlosti oveľa vyššie. Priamo modulované lasery pracujúce až na $2,5 \text{ Gbit.s}^{-1}$ sú k dispozícii aj komerčne k využitiu vo FSO systémoch. Pre vyššie rýchlosti ako je 10 Gbit.s^{-1} alebo vyššie sa používajú externé modulátory pre moduláciu výstupu laserového zdroja.

S ohľadom na foto-detektor sú dostupné lacné kremíkové PIN a APD diódy podporujúce prenos až do rýchlosti Gbit.s^{-1} . Pre prevádzku v pásme vlnových dĺžok $1,5 \mu\text{m}$ sa používajú InGaAs detektory. Niektoré detektory umožňujú šírku pásma až 10 Gbit.s^{-1} . Avšak pri vyšších prenosových rýchlostiach (kratšia doba trvania bitov) je množstvo svetla, ktoré môže byť zhromažďované prijímačom a následne premenené na elektróny nízke a citlivosť prijímača sa stáva závislou na prenosovej rýchlosti. Vo všeobecnosti platí čím vyššia je prenosová rýchlosť, tým menšia je citlivosť. Typická citlivosť pre prenosovú rýchlosť 155 Gbit.s^{-1} je -43 dBm a pre rýchlosť 622 Mbit.s^{-1} je citlivosť -34 dBm. [2]

2.14 Výber vlnovej dĺžky prenosu

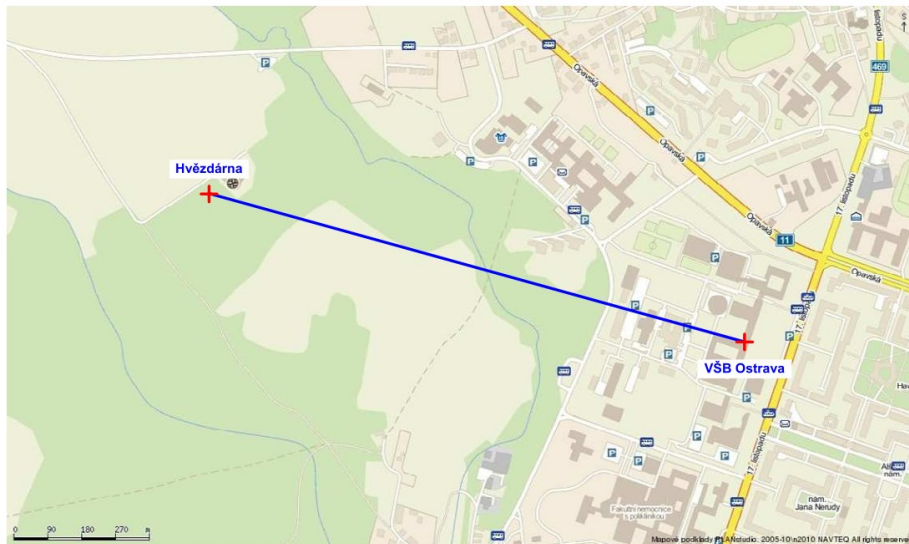
Ak chceme vybrať najlepšiu vlnovú dĺžku pre FSO systémy je potrebné vziať do úvahy niekoľko faktorov. Všeobecne platí, že nie je tak dôležitá konkrétna vlnová dĺžka, ak vybraná vlnová dĺžka prenosu nezodpovedá vlnovej dĺžke, ktorá je silne absorbovaná v atmosfére. Ako bolo vyššie uvedené Mieov rozptyl je dominantný faktor pre zvyšovanie útlmu prenosu infračerveného signálu atmosférou. Avšak pre použitie v husto osídlených mestských oblastiach s vysokým obsahom aerosólov je vhodné použiť inú vlnovú dĺžku ako v relatívne neznečistených prímestských oblastiach. Ďalšou otázkou je použitie vlnovej dĺžky 1550 nm, ktorá umožňuje použiť 100krát vyšší výkon laseru, ktorý je bezpečný pre oko človeka. Čo je v dôsledku, že tekutina v oku absorbuje oveľa viac energie lúča, čím sa predchádza poškodenie sietnice oka. Nevýhodou tohto typu lasera sú predovšetkým náklady v porovnaní s lasermi

pri kratšej vlnovej dĺžke 850 nm. Výber správnej vlnovej dĺžky prenosu zahŕňa mnoho faktorov, ako sú dostupnosť dielov, cena, možná prenosová vzdialenosť, bezpečnosť oka a tak ďalej.

Taktiež boli navrhnuté FSO systémy s prevádzkou v oknách prenosu s väčšími vlnovými dĺžkami napríklad 3-5 μm alebo 8-14 μm a to hlavne s ohľadom pre vynikajúce prenosové vlastnosti atmosféry v tejto oblasti. Avšak niektoré nedávne podrobnejšie štúdie koeficientu Mieho rozptylu v strede infračervenej oblasti naznačujú, že neexistuje žiadna významná výhoda pri použití dlhšej IR vlnovej dĺžky napríklad 3,5 μm namiesto vlnovej dĺžky 850 nm alebo 1550 nm na vyrovnanie strát rozptylu. Taktiež dostupnosť komponentov, ako sú svetelné zdroje a detektory v strednej IR oblasti je veľmi obmedzená. V súčasnej dobe je väčšina vysoko citlivých detektorov a zdrojov svetla je v tomto rozmedzí vlnových dĺžok ale musia byť ochladzované na nízke teploty. Tepelný šum pozadia je oveľa vyšší v strednej oblasti IR dĺžok v porovnaní s kratšími IR vlnovými dĺžkami, čo ovplyvňuje citlivosť detektorov a tým aj hodnotu chybovosti BER. [2]

3 Meracie pracovisko

Na praktickú úlohu bol využitý existujúci optický bezvláknový spoj, ktorý je medzi budovou Rektorátu VŠB-TU v Ostrave a hviezdárňou Johana Palisy (pylónom) v Krásnom Poli. Optický spoj je automatický (nevyžaduje prevádzkovú obsluhu), pracuje nepretržite (24 hodín denne po celý rok) a jedná sa o spoj s priamou viditeľnosťou LoS.



Obrázok 3.1: Zobrazený použitý optický bezvláknový spoj na mape

3.1 Fyzická vrstva

Pre vytvorenie meracieho pracoviska na zisťovanie vplyvu atmosférických javov na FSO boli použité prvky ako laserová hlavica MRV TereScope 5000/G, smerovač ASUS RT-N10 a ako server bolo použité Raspberry Pi.

3.1.1 Optická bezvláknová hlavica

Uchytenie optickej hlavice na budove Rektorátu VŠB, ktorá je používaná v rámci práce je zobrazené na obrázku 3.2. Technické parametre používanej hlavice môžeme vidieť v tabuľke 3.1.



Obrázok 3.2: Laserová hlavica MRV TereScope 5000/G [11]

Bod: Hvezdáreň

VŠB TU Ostrava – Hvězdárna Johana Palisy

725 26 Ostrava - Krásné Pole

Bod: VŠB Ostrava

Rektorát VŠB TU Ostrava

17.listopadu 15/2172

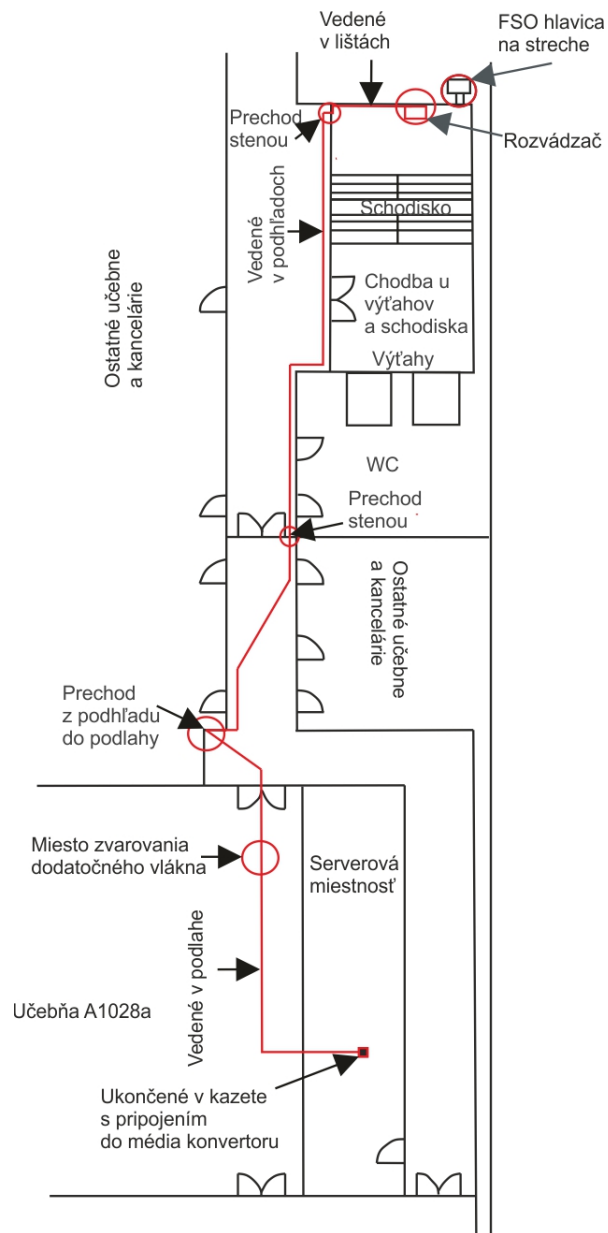
70833, Ostrava-Poruba

Tabuľka 3.1: Technické parametre pre oba body

Model	TS5000G
Dĺžka spoja	1,47 km
Kapacita	1 x 1,25 Gbit.s ⁻¹
Výkon vysielačov	2 x 40 mW, 1 x 60 mW
Vlnová dĺžka	830 -860 nm
Prijímaná úroveň	400
Rozbiehavosť zväzku	2 mrad
Vstupný uhol RX	5 mrad
Citlivosť	-33 dBm
Azimut	107,26°
Elevacia	-0,47°
Prijímač	APD
Citlivosť	-33 dBm
Trieda laseru	1M
Rozhranie	1000 Base-LX

Montáž profesionálnych optických hlavíc realizovala autorizovaná firma Kaiser Data. V rámci predchádzajúcich záverečných prác [11] bolo vybudovanie infraštruktúry a rozvádzača k danej hlavici na budove Rektorátu VŠB-TU Ostrava. Infraštruktúra kabeláže je zobrazená na obrázku 3.3. Optická bezvláknová hlavica je z portu MANAGMENT (RJ-45) pripojená UTP

káblom do LAN portu smerovača umiestneného v rozvádzači. Do WAN portu smerovača je pripojený UTP kábel zo serverovej miestnosti na 10. poschodí Rektorátu VŠB-TU Ostrava.



Obrázok 3.3: Vedenie kabeláže na 10. poschodí budovy Rektorátu VŠB-TU Ostrava [11]

3.1.2 Smerovač ASUS

Na zabezpečenie konektivity z internetu medzi serverom (Raspberry Pi) a klientom bol použitý smerovač ASUS RT-N10. Tento smerovač bol umiestnený do rozvádzača na 10. poschodí budovy Rektorátu VŠB, ktorý bol umiestnený v rámci minulých prác (obrázok 3.4). K tomuto smerovaču je do LAN portov pripojený server (Raspberry Pi) a laserová hlavica pomocou UTP kábla a konektoru RJ 45.



Obrázok 3.4: Zapojený smerovač a server v rozvádzači

3.1.3 Raspberry Pi

Ako server bolo v tejto práci Raspberry Pi model B. Detailná hardvérová špecifikácia Raspberry Pi je uvedená v tabuľke 3.2.

Raspberry Pi (RPi) je počítač so základnou doskou veľkostí približne platobnej karty. Toto zariadenie vyvíja britská nadácia Raspberry Pi Foundation.

Tabuľka 3.2: Hardvérová špecifikácia Raspberry Pi

Procesor	Broadcom ARM1176JZF-S (armv6k) s taktom 700 MHz
Grafika	Broadcom VideoCore IV (Open GL ES 2.0)
Video výstup	HDMI, Kompozitné RCA, DSI rozhranie pre pripojenie LCD panelu
Audio výstup	3,5 mm jack, HDMI, I2S audio
Sieť. karta	10/100 Mb/s Ethernet Adapter
Pamäť RAM	512 MB
Úložný priestor	Slot SD/MMC/SDIO, použitá 32 GB SDHC karta class 10
Ostatné porty	2x USB 2.0, 8x GPIO, I2Cm SPI, I2S audio

3.2 Konfigurácia prvkov

Ďalším potrebným krokom pre správne fungovanie celej logovacej sústavy bolo správne nakonfigurovať dané prvky.

3.2.1 Optická bezvláknová hlavica

Konfigurácia optickej bezvláknovej hlavice bola prebraná z predchádzajúcich záverečných prác. Pre webový prístup na danú hlavicu je potrebné mať nainštalovaný internetový prehliadač a Java SE Runtime Environment. V tomto prípade bola nainštalovaná verzia Java SE Runtime Environment 7 a internetový prehliadač Opera verzie 27, taktiež bolo potrebné udeliť výnimku pre danú adresu hlavice do aplikácie Javy a to nasledovne:

Štart > Java > Java Control Panel > Security > Edit Site List.. > tu pridať adresu hlavice, v tomto prípade `http://10.0.0.211` > ADD > OK > OK.

Následne v prehliadači treba zadať adresu hlavice (`http://10.0.0.211`), po zadaní adresy sa zobrazí možnosť na prihlásenie:



Obrázok 3.5: Možnosť prihlásenia na hlavicu

Z manuálu pre danú hlavicu sú počiatočné údaje pre prihlásenie nasledovné:

User Name: customer Password: cust

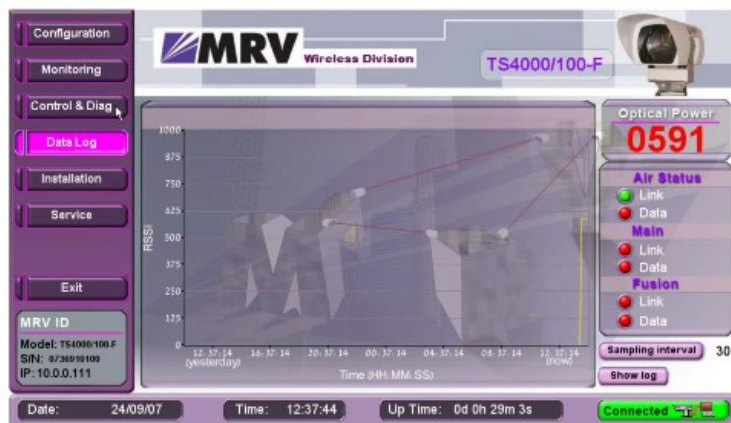
User Name: technician Password: ter1107

Po úspešnom prihlásení sa zobrazí webové rozhranie optickej hlavice.



Obrázok 3.6: Webové rozhranie optickej hlavice

Po prejení do záložky Data Log je možné zobrazit' logované dáta a to stlačením ponuky Show log. Taktiež si v tejto záložke je možné zmenit' interval pre zapisovanie logovaných dát Sampling interval.



Obrázok 3.7: Záložka Data log pre zobrazenie nameraných dát

3.2.2 Smerovač ASUS

Tabuľka 3.3: Počiatočné údaje smerovača ASUS RT-N10

IP adresa	192.168.1.1
Prihlasovacie meno	admin
Heslo	admin

Keďže použitá optická hlavica mala nastavenú IP adresu zo subnetu 10.0.0.0/24, bolo potrebné na smerovači zmenit' používané IP adresy pre našu sieť. Pre zvýšenie bezpečnosti boli zmenené prihlasovacie údaje.

Tabuľka 3.4: Zmenené údaje smerovača ASUS RT-N10

IP adresa	10.0.0.1
Prihlasovacie meno	admin
Heslo	Admin15dp

Pre zabezpečenie bezdrôtového prístupu bola v smerovači vytvorená WiFi sieť s údajmi, ktoré sú zobrazené v tabuľke 3.5.

Tabuľka 3.5: WiFi údaje

SSID	ASUS_RPi
Heslo	Di2pA0SR1pI5

Pre možnosť konfigurácie smerovača z internetu bolo potrebné zmeniť v ponuke: Pokročilé nastavenie > Firewall > Povolit' webovú správu cez WAN na ANO.

Pre prístup k serveru z internetu bolo potrebné presmerovať porty pre dané služby a to v ponuke: Pokročilé nastavenia > WAN > Virtuálny server

SSH_Rpi	2222	10.0.0.50	2222	BOTH	<input type="checkbox"/>
FTP Server	2121	10.0.0.50	2121	BOTH	<input type="checkbox"/>
TELNET Server	2323	10.0.0.50	2323	BOTH	<input type="checkbox"/>
HTTP Server_Rpi	8085	10.0.0.50	8085	BOTH	<input type="checkbox"/>
Remote_Desktop_Rpi	3389	10.0.0.50	3389	TCP	<input type="checkbox"/>
HTTP Server_poj	80	10.0.0.211	80	BOTH	<input type="checkbox"/>

Obrázok 3.8: Presmerované porty pre prístup z internetu

Kde IP adresa 10.0.0.50 patrí serveru a čísla portov službám, ktoré chceme využívať.

Taktiež bolo nastavené pevne pridelovanie IP adresy pre server (Raspberry Pi) a to v ponuke: Pokročilé nastavenia > LAN > Server DHCP. Kde pre MAC adresu b8-27-eb-c9-a7-47 bola vyhradená adresa 10.0.0.50.

Manuálně přiřadit IP k seznamu DHCP		
Povolit manuální přiřazování? <input checked="" type="radio"/> ANO <input type="radio"/> No		
MAC adresa	IP adresa	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button" value="Přidat"/>
b827ebc9a747 10.0.0.50		<input type="button" value="Smazat"/>

Obrázok 3.9: Manuálne priradenie IP adresy na MAC adresu RPi

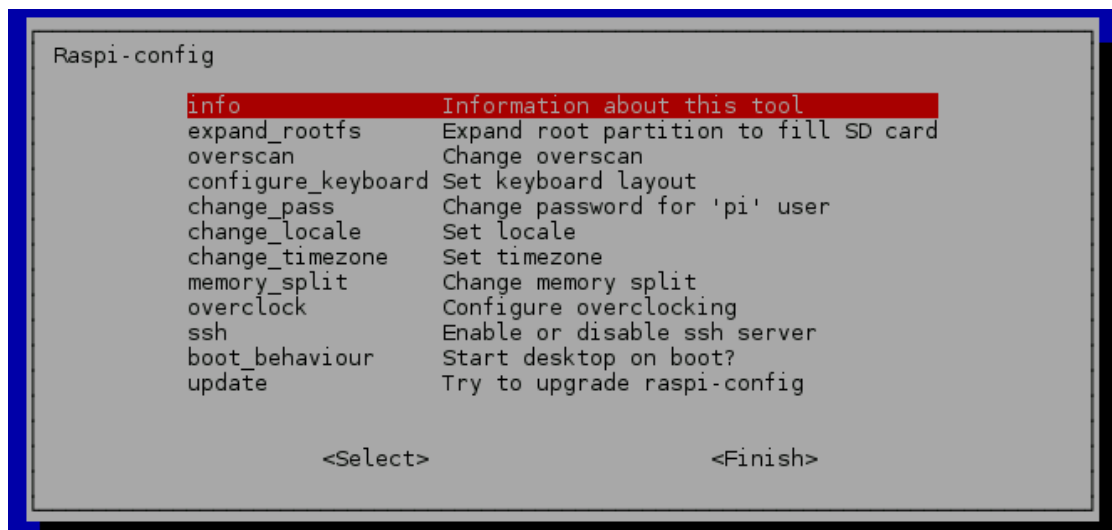
Aby sa mohlo pristupovať z internetu pomocou VPN na smerovač a zariadenia, ktoré sú k nemu pripojené bolo potrebné smerovač zaregistrovať do školskej siete. Od správcov školskej siete bola pre MAC adresu smerovača 10-c3-7b-d5-fc-74 pridelená IP adresa 158.196.25.15.

Prístup na zariadenia je potom realizovaný nasledovne: IP adresa: číslo presmerovaného portu. Napríklad pre prístup na webový server je potrebné zadať do internetového prehliadača adresu s portom a to 158.196.25.15:8085.

3.2.3 Raspberry Pi

Operačný systém, ktorý beží na Raspberry Pi bol zvolený Raspbian (verzia: 2014-01-07-wheezy-raspbian). Obraz OS systému bol stiahnutý z oficiálnej stránky [8]. Pod OS Windows 7 bol pomocou programu WIN 32 Disk Imager Creator na SD kartu vytvorený spustiteľný operačný systém Raspbian. Pre prvotnú prácu s RPi bol použitý program Putty cez protokol SSH, kde boli použité prihlasovacie údaje od výrobcu a to: username: pi password: raspberry.

Po vložení SD karty do RPi a následnom zapnutí RPi, sa po naboťovaní zobrazí tabuľka s počiatočnými nastaveniami, v ktorej je možné zmeniť nastavenie pre SSH server, časové pásmo, heslo, veľkosť oddielu na SD karte, taktovaciu frekvenciu procesora a ďalšie.



Obrázok 3.10: Tabuľka pri prvotnom nastavení systému.

Po nabootovaní systému do textového režimu bolo pre inštaláciu programov a služieb potrebné prepnúť do užívateľa root, keďže užívateľ pi nemal práva na inštaláciu (1). Pri zmene je potrebné zadať heslo pre užívateľa pi. Ďalej bolo zmenené heslo pre užívateľa pi na heslo dp. Aby boli používané najnovšie balíčky systému je nutné ich aktualizovať (2).

(1) `sudo -i`

(2) `apt-get update`

Následne je nutné nainštalovať programy a balíčky, ktoré sú potrebné pre vytvorenie požadovaného serveru.

Na vytvorenie webového serveru bol zvolený balíček apache2 (3).

Pre podporu PHP jazyka a následným prepojení s apache boli nainštalované balíčky php5 a libapache2-mod-php5 (4).

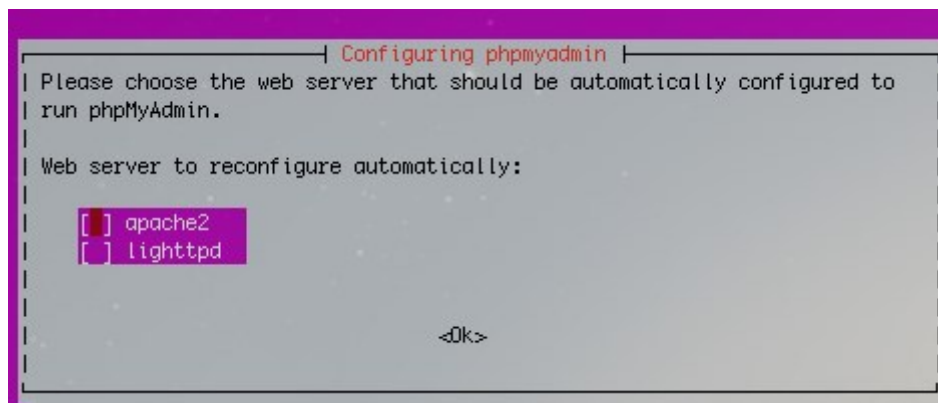
Merané dáta sú ukladané do databázy, pre tento účel bola zvolená MySQL databáza, a preto bolo nutné nainštalovať samotnú databázu a balíček na komunikáciu s danou databázou a to mysql-server php5-mysql (5).

Pri inštalácii týchto balíčkov sa zobrazila tabuľka na zadanie hesla pre užívateľa root, ktorý sa vytvorí na databáze.

Na správu MySQL databázy bol nainštalovaný phpmyadmin (6), počas inštalácie sa zobrazí okno, kde je potrebné zadať prepojenie s webovým serverom Apache.

Nakoniec boli udelené plné práva pre priečinok /var/www (7), pre možnosť zobrazenia a úpravy súborov a služba je reštartovaná(8).

Pre prístup na vzdialenú plochu RPi v grafickom režime bol použitý protokol xrdp (9).



Obrázok 3.11: Prepojenie phpMyAdmin s Apache2

- (3) `apt-get install apache2`
- (4) `apt-get install php5 libapache2-mod-php5`
- (5) `apt-get install mysql-server php5-mysql`
- (6) `apt-get install phpmyadmin`
- (7) `chmod -R 777 /var/www/`
- (8) `/etc/init.d/apache2 restart`
- (9) `apt-get install xrdp`

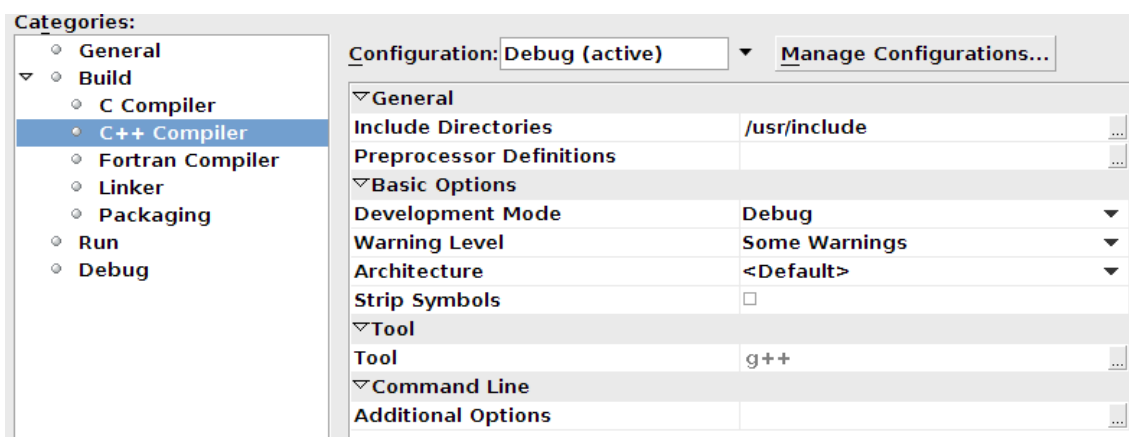
Pre možnosť vytvárania aplikácie na logovanie dát, ktorá pracuje s MySQL databázou bolo nutné nainštalovať balíček boost (10).

Pre naprogramovanie aplikácie bol použitý program Netbeans, ktorý bol stiahnutý z oficiálnych stránok Netbeans a to verzia `netbeans-8.0.2-cpp-linux.sh` a následne spustená inštalácia programu (11).

- (10) `apt get install libboost-system1.49.0-dev`
- (11) `bash netbeans-8.0.2-cpp-linux.sh`

Po dokončení inštalácie bolo možné začať programovať aplikáciu na logovanie dát v grafickom režime RPi. Pre naprogramovanie aplikácie bol zvolený jazyk C++. V programe Netbeans bol vytvorený nový projekt a to: File > New Project > C++ Application > Next > Zadať meno projektu > Finish. Aby aplikácia dokázala pracovať s MySQL a boost knižnicami bolo nutné nastaviť projekt nasledovne:

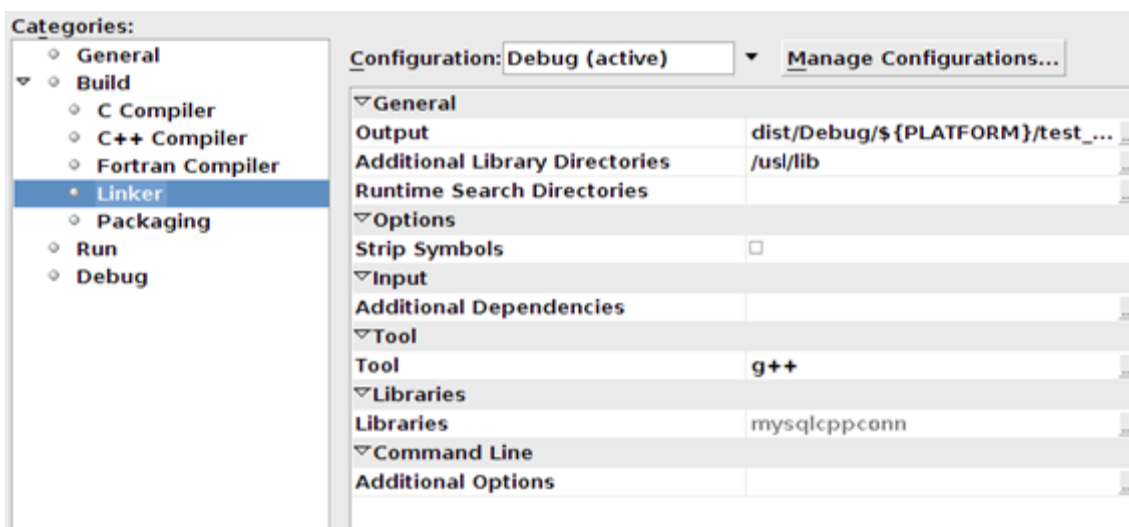
Project Properties > Build > C++ Compiler > General > Include Directories > pridať cestu k `/usr/include`.



Obrázok 3.12: Nastavenie C++ Compiler

Project Properties > Build > Linker > General > Additional Library Directories > pridať cestu k /usr/lib

Project Properties > Build > Linker > Libraries > Libraries > vybrať mysqlcppconn (v /usr/lib/libmysqlcppconn.so)



Obrázok 3.13: Nastavenie dynamickej knižnice

3.3 Vytvorenie databázy

Po nainštalovaní balíčkov pre databázu a phpmyadmin pre správu databázy, bolo možné vytvárať databázu cez webové rozhranie. Na webové rozhranie sa dostaneme cez internetový prehliadač zadáním adresy localhost/phpmyadmin.

Obrázok 3.14: Úvodná tabuľka pre prihlásenie na phpmyadmin

Po načítaní stránky nasleduje tabuľka pre prihlásenie pod údajmi, ktoré boli vytvorené pri inštalácii (meno: root, heslo: 123). Po správnom prihlásení bolo možné vytvoriť databázu a to v hornej lište: Databázy > názov databázy (v tomto prípade vsb) > Vytvoriť. Následne bolo potrebné vytvoriť tabuľky, do ktorých sa budú vkladať dáta. Vytvorenie tabuliek sa môže realizovať dvoma spôsobmi, buď pomocou SQL príkazov alebo jednoduchým klikaním v grafickej ponuke.

Pri vytváraní tabuľky pre dáta z optickej hlavice sa zadával názov tabuľky (stats), stĺpcov (id, date_time, rssi), dátový typ (int, datetime, int), index (unique key pre date_time, primary key pre id), predvolené hodnoty (pre id, date_time, rssi), automatická inkrementácia (pre id), zotriedenie(utf8_slovak_ci) a úložný systém tabuľky(InnoDB).

#	Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Extra	Action
<input type="checkbox"/>	1 id	int(11)			No	None	AUTO_INCREMENT	Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/>	2 date_time	datetime			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/>	3 rssi	int(11)			No	None		Change Drop Primary Unique

Obrázok 3.15: Tabuľka stats pre dáta z optickej hlavice

Pri vytváraní tabuľky pre dáta z meteorologickej stanice sa zadával názov tabuľky (meteo), stĺpcov (id, date_time, temp, hum, wind, bar, windchill, winddir, dew, rain, solarr), dátový typ (int, datetime, double, double, double, double, char(3), double, double, double, double), index (unique key pre date_time, primary key pre id), predvolené hodnoty, automatická inkrementácia (pre id), zotriedenie(utf8_slovak_ci) a úložný systém tabuľky (InnoDB). Nastavenie unikátneho indexu pre date_time nám umožní prepisovať hodnoty s rovnakým dátumom.

#	Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Extra	Action
<input type="checkbox"/> 1	id	int(11)			No	None	AUTO_INCREMENT	Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 2	date_time	datetime			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 3	temp	double			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 4	hum	double			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 5	wind	double			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 6	bar	double			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 7	dew	double			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 8	windchill	double			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 9	winddir	char(3)	utf8_slovak_ci		No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 10	rain	double			No	None		Change Drop Primary Unique
<input type="checkbox"/> 11	solarrr	double			No	None		Change Drop Primary Unique

Obrázok 3.16: Tabuľka meteo pre dáta z meteorologickej stanice

3.4 Návrh aplikácie

Ako už bolo spomenuté pre návrh aplikácie na spracovanie nameraných dát bol použitý programovací jazyk C++ a MySQL databáza. V práci boli vytvorené 2 aplikácie a to pre spracovanie dát z optickej hlavice, pomenovaná ako stats a aplikácia pre dáta z meteorologickej stanice, pomenovaná ako meteo.

3.4.1 Aplikácia pre spracovanie dát z optickej hlavice

Táto aplikácia spracováva logované dáta, ktoré sa ukladajú do tabuľky na html stránke. Táto tabuľka obsahuje dátum, čas, RSSI, prúd, teplotu vo vnútri hlavice a status bity hlavice. Aplikácia vyberie hodnoty pre dátum, čas a RSSI a vloží ich do databázy.

Index	Date And Time	Rssi	Bias	Temp	StatusFlags[9..0]
0	20/02/15 12:10:37	257	46	27	00 0100 0011
1	20/02/15 12:08:36	290	46	27	00 0100 0011
2	20/02/15 12:06:36	279	46	27	00 0100 0011
3	20/02/15 12:04:35	274	46	27	00 0100 0011

Obrázok 3.17: Ukážka tabuľky na stránke pre spracovanie

```

</TR>
<TR><TD>0</TD><TD>&nbsp;20/02/15 12:10:37</TD><TD>&nbsp;257</TD><TD>&nbsp;46</TD><TD>&nbsp;27</TD><TD>&nbsp;00 0100
0011</TD><TR><TD>1</TD><TD>&nbsp;20/02/15 12:08:36</TD><TD>&nbsp;290</TD><TD>&nbsp;46</TD><TD>&nbsp;27</TD><TD>&nbsp;00
0100 0011</TD><TR><TD>2</TD><TD>&nbsp;20/02/15
12:06:36</TD><TD>&nbsp;279</TD><TD>&nbsp;46</TD><TD>&nbsp;27</TD><TD>&nbsp;00 0100
0011</TD><TR><TD>3</TD><TD>&nbsp;20/02/15 12:04:35</TD><TD>&nbsp;274</TD><TD>&nbsp;46</TD><TD>&nbsp;27</TD><TD>&nbsp;00
0100 0011</TD><TR><TD>4</TD><TD>&nbsp;20/02/15
12:02:35</TD><TD>&nbsp;272</TD><TD>&nbsp;46</TD><TD>&nbsp;27</TD><TD>&nbsp;00 0100
0011</TD><TR><TD>5</TD><TD>&nbsp;20/02/15 12:00:34</TD><TD>&nbsp;257</TD><TD>&nbsp;46</TD><TD>&nbsp;26</TD><TD>&nbsp;00
0100 0011</TD><TR><TD>6</TD><TD>&nbsp;20/02/15

```

Obrázok 3.18: Ukážka html kódu stránky na spracovanie

Na začiatku aplikácie bolo potrebné pridať programovacie knižnice, ktoré sa budú využívať. Štandardné knižnice ako `iostream` (pre funkcie ako vstup z klávesnice alebo výstup na obrazovku), `fstream` (spracovanie súborov), `string` (práca s reťazcami znakov - string), `sstream` (na prácu s reťazcami znakov zo súboru), Pre prácu z MySQL databázou

a podporu MySQL connectoru je potrebné pridať aj knižnice ako `mysql_driver`, `connection`, `exception`, `statement`.

Pre prácu s databázou a súborom ktorý bol použitý ako vstup boli definované prihlasovacie údaje k databáze, názov databázy, tabuľky a cesta k súboru, ktorý sa spracovával.

Pre získanie správneho tvaru dátumu (tvar na vstupe z html stránky: dd/mm/yyyy hh:mm:ss) bola vytvorená funkcia `convert_datetime` ktorej parameter je `string str`. Na tento tvar dátumu bola použitá funkcia `substr()`, ktorá udáva pozíciu od ktorého znaku v poradí a koľko znakov sa má vybrať (napríklad `str.substr(3,2)` od tretieho znaku sa vyberú dva znaky). Výstupom tejto funkcie je reťazec znakov so správnym tvarom dátumu a času (yyyy-dd-mm hh:mm:ss).

Hlavná funkcia aplikácie pracuje so súborom, kde prechádza po riadkoch až kým nenájde riadok s reťazcom znakov `<TR><TD>`. Tento reťazec znakov určuje začiatok tabuľky v ktorej sú potrebné dáta. Ak sa na riadku nachádza reťazec `<TR><TD>` tak sa do premennej `line` uloží aktuálny riadok v súbore.

Následne je deklarovaná premenná, ktorá obsahuje SQL príkaz. Táto premenná je typu `stringstream` lebo je rýchlejšie brať celý stream ako spájať nejaké znaky za sebou. Ako SQL príkaz bol použitý `REPLACE INTO`, aby sa hodnoty s rovnakým dátumom nahradili a nové pridali. Aby bolo známe koľko riadkov sa našlo bola deklarovaná premenná `num`, pre ukladanie aktuálnej pozície premenná `pos`.

Postupne sa na riadku hľadá reťazec znakov ` `, ktorý je pred každou hodnotou, ktorú chceme spracovať, a pozícia tohto ` ` sa uloží do premennej `pos` aby sa vyhľadávalo vždy od poslednej pozície. Vyhľadávať sa bude pokiaľ sa premenná `pos` nerovná `string::npos` (tento výstup vracia funkcia `line.find()` v prípade, že daný reťazec nenájde). Vyberie sa dátum a spracuje sa na začiatku vytvorenou funkciou `convert_datetime()`. Napríklad nájde sa pozícia ` `, ktorá je na pozícii 37 (a teda `pos = 37`), takže dátum bude o 6 znakov ďalej (preskočenie ` `) od tejto pozície (`pos + 6`) sa vyberie 17 znakov, v ktorých je dátum.

Pre hodnoty RSSI je vytvorená premenná `rss`. Kde sa na vybraný string reťazec najprv použije funkcia `c.str()`, ktorá prevedie `string` na `char` a následne funkcia `atoi`, ktorá prevedie `char` na `integer`. K aktuálnej hodnote `pos` sa pripočíta 38 znakov, po ktorých nasleduje hodnota RSSI a vyberie sa 5 znakov. Následne sa na koniec SQL príkazu (v premennej `insert_cmd_ss`) pridajú dané hodnoty (napríklad `("(2014-01-01', 12345),")`).

Ďalej sa do premennej `pos` uloží pozícia, ktorá značí koniec riadka v tabuľke (`</TD><TR>`), keďže nie každý nový riadok v tabuľke je aj nový riadok v súbore bude sa vyhľadávať ďalej doprava od poslednej pozície. Ak ale narazil nakoniec riadka uloží do premennej `pos` nulovú hodnotu. Nakoniec ak sa prešli všetky riadky sa vypíše počet nájdených riadkov a ukončí sa hľadanie.

Následne treba výsledný stream previesť na string a výsledok uloží do skôr vytvorenej premennej `insert_cmd`. Takže výsledný SQL príkaz by vyzeral nasledovne
`REPLACE INTO " << TABLE_NAME << " (date_time, rssi) VALUES ('2015-02-02 11:00:00', 12345), ('2014-02-02' 11:01:00, 12346), "`. Pre odstránenie čiarky na konci, ktorá robila problémy pri vkladani je odstránená.

V ďalšej časti aplikácie je vytvorený SQL príkaz vložený do databázy. Kde sa najprv vytvorí spojenie aplikácie s databázou, podľa na začiatku definovaných údajov, a následne je zavolaný SQL príkaz, ktorý bol postupne vytváraný v aplikácii.

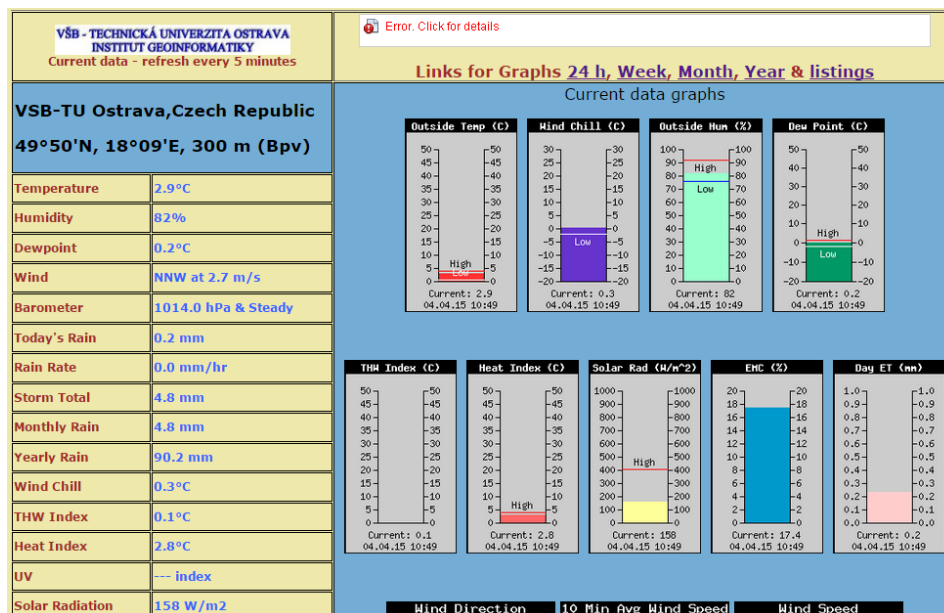
Nakoniec je ešte potrebné použiť výnimky, ktoré sa zachytia pri rôznych chybách počas behu aplikácie (napríklad ak neexistuje daný súbor, ak je rozsah hodnôt väčší ako je definované a iné.)

3.4.2 Aplikácia pre spracovanie dát z meteorologickej stanice

Táto aplikácia spracováva dáta zo školskej meteorologickej stanice. Kde náhľady stránok sú na nasledujúcich obrázkoch 3.19 a 3.20.

Current Conditions at VSB-TU Ostrava (49°50'N, 18°09'E, 300 m) as of 08.03.15 15:26: Temperature 10.8°C Humidity 45% Dewpoint -0.6°C Wind SW at 4.9 m/s Barometer 1029.3 hPa & Falling Slowly Wind Chill 8.4°C THW Index 7.5°C Heat Index 9.9°C Today's Rain 0.0 mm Storm Total 0.0 mm Monthly Total 1.8 mm Yearly Total 66.0 mm Current Rain Rate 0.0 mm/hr Sunrise: 6:17 Sunset: 17:40

Obrázok 3.19: Ukážka webovej stránky s meteorologickými dátami



Obrázok 3.20: Ukážka 2. webovej stránky

Current Conditions at VSB-TU Ostrava (49°50'N, 18°09'E, 300 m) as of 08.03.15 15:26:
Temperature 10.8°C
Humidity 45% Dewpoint -0.6°C
Wind SW at 4.9 m/s
Barometer 1029.3 hPa & Falling Slowly Wind Chill 8.4°C
THW Index 7.5°C
Heat Index 9.9°C
Today's Rain 0.0 mm Storm Total 0.0 mm
Monthly Total 1.8 mm Yearly Total 66.0 mm Current Rain Rate 0.0 mm/hr
Sunrise: 6:17 Sunset: 17:40

Obrázok 3.21: Ukážka html kódu stránky

```
<td bordercolor="#000000" style="border: thin solid rgb(0,0,0)" ><font face="verdana, Arial, Helvetica"><strong><font color=Brown><small>Solar Radiation<br></small></font></strong></font></td>
<td bordercolor="#000000" style="border: thin solid rgb(0,0,0)" ><font face="verdana, Arial, Helvetica"><strong><font color="#3366FF"><small>158&nbsp;W/m2<br></small></font></strong></font></td>
```

Obrázok 3.22: Ukážka html kódu 2. stránky

Začiatok aplikácie je rovnaký ako u aplikácie, ktorá je popísaná v kapitole 3.4.1. Popísané potrebné knižnice, definované údaje pre prístup k databáze sú rovnaké s výnimkou tabuľky (meteo) a cesty k súboru, ktorý sa bude spracovávať. Pre konvertovanie dátumu a času z formátu dd.mm.yy hh:mm bola vytvorená funkcia `convert_datetime`, ktorej výstup je formát yyyy-mm-dd hh:mm:ss.

V hlavnej funkcii aplikácie je vytvorená premenná, ktorá bude obsahovať SQL príkaz. Taktiež v tejto aplikácii, sa spracovávajú dáta zo súborov, a preto sa používa `ifstream`.

Pre prechod medzi riadkami v súbore je použitá funkcia `getline()`.

Pre spracovanie dátumu a času sa vyberie od 69 pozície 14 znakov, ktoré obsahujú dátum a čas.

Pre hodnotu teploty bola vytvorená premenná `temp` typu `double`, z dôvodu možnosti kladných a záporných desatinných čísiel. Hodnota teploty sa nájde podľa pozície reťazca `Temperature` v danom súbore, po uložení pozície tohto slova do premennej `pos` sa preskočí počet znakov v tomto slove a vyberú sa číselné hodnoty. Na tento reťazec sa najprv použije funkcia `c_str()` pre prevod na `char` a následne `atof` na prevod na typ `float`, ktorý je podporovaný v databáze.

Po prechode na ďalší riadok sa z pozície 8 vyberie číselná hodnota pre vlhkosť, takéto riešenie je možné v prípade, že požadovaná hodnota je stále na rovnakej pozícii.

V prípade zistenia rosného bodu sa nájde na rovnakom riadku reťazec `Dewpoint`, uloží sa pozícia tohto reťazca do premennej `pos`.

Následné sa tento reťazec preskočí počet znakov v tomto slove a vyberie daná hodnota.

Pre získanie hodnoty smeru a rýchlosti vetra treba prejsť na ďalší riadok v súbore funkciou `getline(file, line)`. Pre smer vetra sa od piateho znaku nájde medzera v ďalších piatich znakoch. Od pozície medzery sa odčíta 5 a vyberie výsledný počet znakov (napríklad medzera bude na 8. Pozíciu odčíta sa 5, a teda od 5 znaku sa vyberú tri znaky čo môže byť napríklad SSW).

Pre zistenie hodnoty pre rýchlosť vetra, je potrebné prejsť na požadovaný riadok v súbore do premennej `pos` uložiť pozíciu znaku `at` a a vybrať hodnotu z pozície `pos + 2`. Riešenie rovnaké ako pre vlhkosť je vybrané aj pre hodnotu tlaku, ktorá je na pozícii 9 ďalšieho riadka.

Pre získanie hodnoty pocitovej teploty sa nájde spojenie `Wind Chill` a uloží sa pozícia. Následne sa preskočí tento reťazec `pos+10` a vyberie príslušná hodnota.

Pre hodnotu dažďa treba prejsť o 3 riadky nižšie funkciou `getline(file, line)`. Hodnota dažďa je stále na rovnakej pozícii, preto je možné vybrať hneď danú hodnotu na 12 pozícii.

Pre získanie hodnoty slnečného žiarenia je potrebné pracovať s druhým súborom. Kde v podmienke `while` určujeme, že chceme vybrať riadky druhého súboru (`getline(file2, line2)`). V danom súbore sa vyhľadáva reťazec `<small>Solar Radiation
`. Funkcia `line2.find` v prípade, že nenájde daný reťazec vráti `string::npos`, a preto ak sa nebude tomuto rovnáť podmienka `if` sa zastaví a ukončí sa taktiež podmienka `while`. Následne je potrebné prejsť o 2 riadky nižšie v súbore, nájsť pozíciu reťazca `<small>`, ktorý je pred hodnotou slnečného žiarenia. Pričítaním hodnoty 7 k premennej `pos` sa preskočí a následne vyberie hodnota slnečného žiarenia.

Následne príkaz SQL bude vyzerat' v premennej `insert_cmd` takto `REPLACE INTO " << meteo << " (date_time, temp, hum, wind, bar, dew, windchill, winddir, rain, solarr) VALUES ('2015-02-02 11:00:00', 5.4, 80, 6, 1021.9, 1.5, 0.9, S, 0.0, 254) "`. Nakoniec sa prevedie na `string` a odstráni sa posledná čiarka.

V ďalšej časti sa vytvorí spojenie s databázou a zavolá SQL príkaz, ktorý je uložený v premennej `insert_cmd`. Rovnako ako pri predchádzajúcej aplikácii je nutné použiť výnimky pre chyby, ktoré môžu nastať za behu programu.

3.4.3 Bash scripty

Pre automatický beh aplikácii, sťahovanie web stránok a ďalšie úkony boli vytvorené bash scripty, ktoré sa skladajú z jednotlivých príkazov v Linuxe. Na vytvorenie bash scriptov je potrebné vytvoriť súbory s príponou `sh` (napríklad v textovom editore). Po skompilovaní aplikácii je potrebné nájsť spustiteľné súbory, týchto aplikácii a skopírovať ich do priečinku `/home/pi/`.

Cesta k týmto súborom je nasledovná: /home/pi/NetBeansProject/názov projektu (stats alebo meteo)/dist/Debug/GNU-LINUX-x86/názov súboru (stats alebo meteo).

Tieto bash scripty sú umiestnené v domovskom priečinku užívateľa pi (/home/pi). V tomto priečinku sú umiestnené aj stiahnuté web stránky, potrebné na spracovanie a spustiteľné súbory vytvorených aplikácií.

```
#!/bin/bash
while true;
do
    wget http://meteo.vsb.cz/pocasi/data_sebesta.htm
    wget http://meteo.vsb.cz/pocasi/index.htm
    ./meteo
    echo "Finished"
    rm data_sebesta.htm
    rm index.htm
    sleep 50
done
```

Obrázok 3.23: Bash script *down_meteo.sh*

Na začiatku scriptu *down_meteo* sa pomocou `#!/bin/bash` informuje shell, že ma ako interpret spustiť `/bin/bash`. Nasleduje nekonečná podmienka, v ktorej sú jednotlivé príkazy. Na začiatku je potrebné stiahnuť jednotlivé web stránky na spracovanie. Po dokončení sťahovania sa spustí súbor vytvorenej aplikácie. Po skončení tejto aplikácie sa stiahnuté stránky odstránia, aby sa predchádzalo premenovaniu sťahovaných stránok. Po dokončení všetkých príkazov sa nastaví uspanie daného bash scriptu na dobu 50 sekúnd, čím dosiahneme že dáta budú zaznamenávané každú minútu.

```
#!/bin/bash
while true;
do
    rm events.htm
    wget http://10.0.0.211/events.htm
    cp events.htm /home/pi/data.htm
    ./script
    echo "Finished"
    sleep 43200
done
```

Obrázok 3.24: Bash script *down_stats.sh*

Začiatok scriptu *down_stats* je rovnaký ako v prípade prvého bash scriptu. Ako prvé je potrebné stiahnuť web stránku na spracovanie. Po dokončení sťahovania sa spustí súbor vytvorenej aplikácie. Po skončení tejto aplikácie sa stiahnuté stránky odstránia, aby sa predchádzalo premenovaniu sťahovaných stránok. Po dokončení všetkých príkazov sa nastaví uspanie daného bash scriptu na dobu 43200 sekúnd čo je 12 hodín, čím dosiahneme že tento script sa bude spúšťať dvakrát za deň.

Po vytvorení bash scriptov a uložení do /home/pi/ bolo potrebné z bash scriptov urobiť spustiteľné súbory príkazom `chmod a+x názov scriptu`. Týmto príkazom určíme práva

pre všetkých na spustenie daného scriptu. Následne stačí dané scripty spustiť a to nasledovne: `bash názov_scriptu`.

3.5 Návrh webovej stránky

Pre grafické vyhodnocovanie nameraných dát bola v rámci práce vytvorená webová stránka. Táto stránka je dostupná zo školskej siete ja adrese 158.196.25.15:8085/html/. Stránka bola vytvorená v anglickom jazyku s kódovaním UTF-8. Hlavnú časť tvorí HTML kód, ktorý tvorí hlavnú kostru stránky. HTML kód je doplnený o CSS štýly (súbor styles.css), ktoré slúžia na definovanie grafických štýlov stránky. Obrázky 3.25, 3.26 a 3.27 zobrazujú náhľad webovej stránky.

Štruktúru stránky môžeme vidieť na obrázku 3.25 a je riešená nasledovne: blok s hlavičkou stránky a menu, obsah stránky s tabuľkami, grafmi a nakoniec je na stránke päta.

Pre získavanie dát z databázy potrebných k vykresľovaniu bol vytvorený samostatný súbor `select.php`. V tomto súbore sú vytvorené 2 polia. Prvé pole obsahuje jednotlivé hodnoty (napríklad `date_time`, `rss`, `temp`, `hum` atď) a druhé pole maximálne a minimálne hodnoty pre dátumy.

Pre jednotlivé položky z menu stránky boli vytvorené vlastné súbory (`index.php`, `meteo.php`, `rss.php`, `temp.php`, `dew.php`, `rain.php`, `bar.php`, `solar.php`).

Menu je vytvorené pomocou zoznamu a obsahuje položky ako Home, RSSI, Meteo, Temp, Humidity, Pressure, Wind, Rain, Radiation.

Položka Home obsahuje základné informácie o stránke a kontakty, položka RSSI obsahuje tabuľku s exploračnou analýzu meraných dát pre rôzne intervaly a graf pre namerané dáta z optického bezvláknového spoja.

Ďalšou položkou v menu je Meteo, ktorá obsahuje súhrne grafy a štatistickú tabuľku pre všetky logované dáta z meteo stanice.

About

Service has been developed under the solving of master thesis by student Martin Chrenšć. Meteorological data are logged at periodical intervals from University meteorological station, and RSSI data from FSO. Meteorological station are located in Ostrava Poruba (49°50'N, 18°09'E). FSO link is located on building A of University campus and second site FSO is in Pustkovec. This FSO link is 1,47 km long. As the server is used Raspberry Pi, which are located MySQL database, apache server and applications. On Raspberry Pi is running applications written in programming language C++. This applications parse downloaded web sites with meteorological data and data from FSO link and sends them to MySQL database. Data from weather station are logged every minute, data from FSO link are logged every 12 hours. Web page composed of HTML, CSS, PHP, Javascript.

[ABOUT](#) | [CONTACT](#)

© Copyright 2015 Martin Chrenšć | VŠB Technical University of Ostrava

Obrázok 3.25: Dizajn stránky

V ďalších položkách sú zobrazené tabuľky a grafy pre jednotlivé veličiny z meteorologickej stanice samostatne. Odrážky v menu obsahujú odkaz na vytvorené súbory. Jednotlivé položky v menu jem možné rolovať, kde sa nachádzajú rôzne intervaly pre tabuľky s výpočtami exploračnej štatistiky.

Každému odkazu je priradená premenná pomocou, ktorej sa neskôr rozozná, pre aký meraný interval sa ma zobrazit' tabuľka. Zobrazenie tabuliek s rôznymi intervalmi je riešené pomocou PHP kódu.

V tomto PHP kóde sa pomocou príkazu `$_GET['val']` zisťuje aká hodnota premennej `val` bola predaná v odkaze po kliknutí na daný odkaz v hlavnom menu.

Vytvorené súbory obsahujú niekoľko podmienok, ktoré sa majú vykonať podľa predanej premennej.

Nasleduje premenná `sql`, do ktorej je uložený SQL príkaz pre výber z databázy. Následne je vytvorená premenná `result`, do ktorej sa ukladá výsledok dotazu s premenou `sql`. Do premennej `row` sa ukladá zavolaný výsledok z predchádzajúceho dotazu. Pre výpočet exploračnej analýzy meraných dát boli využité funkcie priamo z MySQL databázy a to pre priemer – `Avg(veličina)`, pre maximálnu a minimálnu hodnotu – `MAX(veličina)`, `MIN(veličina)`. V prípade výpočtu mediánu, bola vytvorená jednoduchá funkcia.

Ďalšou časťou stránky je tabuľka, kde podľa premennej `row` pozná, s ktorým dotazom a pracovať a pomocou názvu daného výberu (napríklad priemer pre teplotu za poslednú hodinu je označený ako `avgth`) sa pozná, ktorú hodnotu ma zobrazit'. Týmto je dokončené zobrazenie

výpočtov štatistiky pre rôzne intervaly. V prípade záložky RSSI a jednotlivých veličín z meteorologickej stanice sa vykonáva výpočet štatistických údajov oddelene pre denné hodiny a nočné hodiny.

Last 12 Hours RSSI				
Average	Median	Deviation	MAX	MIN
424.65	371	49.09	537	291

Obrázok 3.26: Ukážka tlačidla pre exportovanie dát z databázy a tabuľka so exploračnou analýzou

Ďalšou časťou stránky je vykresľovaný graf a posuvník pre výber intervalu (obrázok 3.27), pre ktorý sa dáta majú vykresliť. Na vykresľovanie grafov bola použitá Javascript knižnica Dygraphs[12], pre posuvník intervalu boli použité Javascript knižnice jqDateRangeSlider-min, jquery-ui.min.js, jquery-2.1.1.min.js stiahnuté z [13].

Pre vykresľovanie grafov bolo vytvorených niekoľko funkcií v poli scriptov.

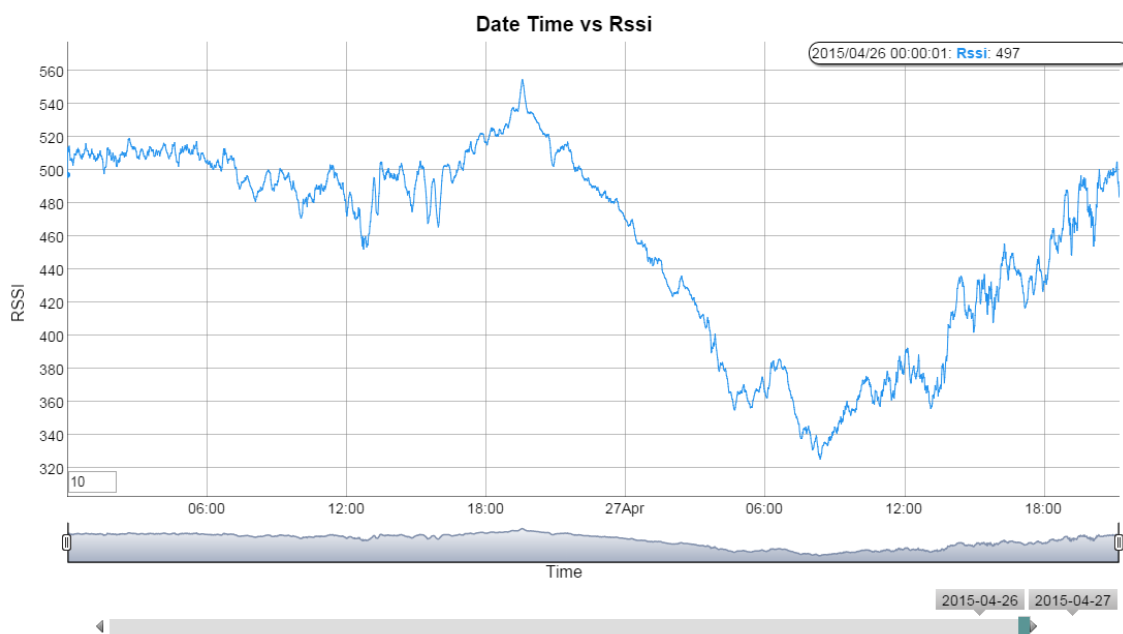
Pre úpravu dátumu bola vytvorená funkcia `ToDate()`.

Pre počiatočnú hodnotu grafu (nepriblížený graf) bola vytvorená funkcia `unzoomGraph()`. Funkcia `overaly()` slúži na zobrazenie vrstvy dát v grafe.

Ďalšia vytvorená funkcia bola pre obnovovanie dát v grafe a to `refreshData()`. V tejto funkcii je využitý JSON (Javascript objekt), ktorý sa používa pre prenos dát z databázy.

Posledná funkcia slúži na samotné vytvorenie grafu. V záložke Meteo, sú jednotlivé grafy synchronizované v rámci približovania v grafov a aj v rámci nastavenia intervalu, pre ktorý sa majú dáta vykresliť. Pre synchronizáciu bol využitý Javascript dostupný zo stránok pre grafy Dygraphs [12].

Približovanie v grafoch v rámci záložky Meteo sa vykonáva pomocou zatiahnutia oblasti v grafe, pre vrátenie do počiatočnej, nepriblíženej hodnoty je potrebný dvojklik. Jemné posúvanie intervalu priamo v grafe sa realizuje kombinácie: držaním klávesy SHIFT a klik do grafu a následným posúvaním myšky. V ostatných záložkách je pridaný posuvník, ktorý slúži pre približovanie a pohybovanie v grafoch.



Obrázok 3.27: Ukážka vykreslených dát do grafu pomocou Dygraphs

V prípade záložky Custom, v ktorej si užívateľ zadá z kalendáru zadá pre aký interval sa ma vykonať výpočet štatistickej analýzy dát. Pre výber dátumu z kalendáru bol použitý Javascript dostupný na [13]. V záložkách Meteo a RSSI je možné vykonať export logovaných dát do súboru, a to v podzáložkách Hour a Custom. Tento export je rozdelený na dáta v celom intervale logovania (podzáložka Hour) a dáta v užívateľom definovanom intervale (podzáložka Custom). Export sa vykoná až po kliknutí tlačidla Export. Následne sa v prehliadači otvorí nové okno s exportovanými dátami, ktoré je možné si uložiť (ponuka - uložiť ako). Pre exportovanie dát s RSSI hodnotami respektíve pre meteo dáta sa vytvorí na servery textový súbor rssi.txt, resp. meteo.txt. V prípade exportu dát z intervalu kalendára sa vytvoria súbory rssic.txt a meteoc.txt.

Measured RSSI

From To Export

Selected Date:

Custom Interval Solar Radiation [W/m²]				
Average	Median	Deviation	MAX	MIN

Obrázok 3.28: Záložka Custom pre export a analýzu dát užívateľom definovanom intervale pred vybraním dátumu

Measured RSSI

From To Export

Select 2015

Su	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

Custom Interval Solar Radiation [W/m²]			
Median	Deviation	MAX	MIN

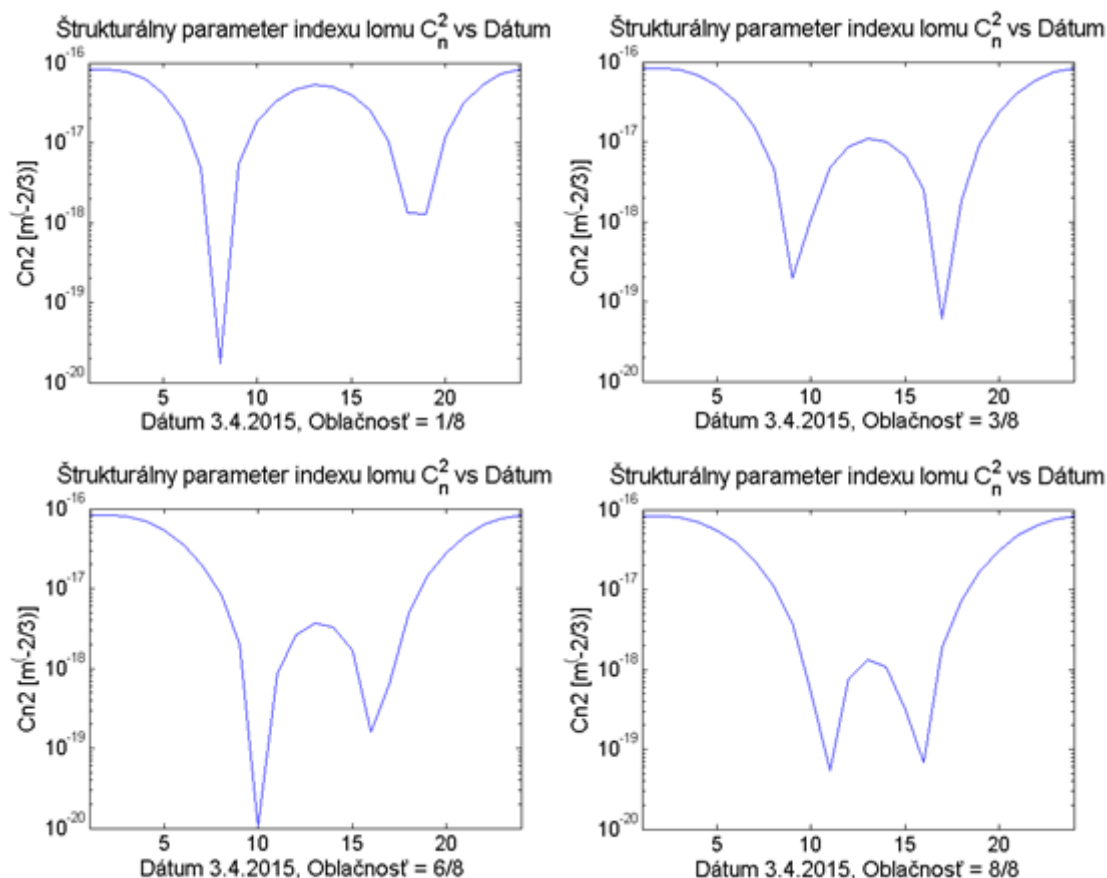
Obrázok 3.29: Záložka Custom pre export a analýzu dát v užívateľom definovanom intervale pri výbere dátumu z kalendára

4 Vyhodnotenie vplyvu atmosférických javov na FSO spoj

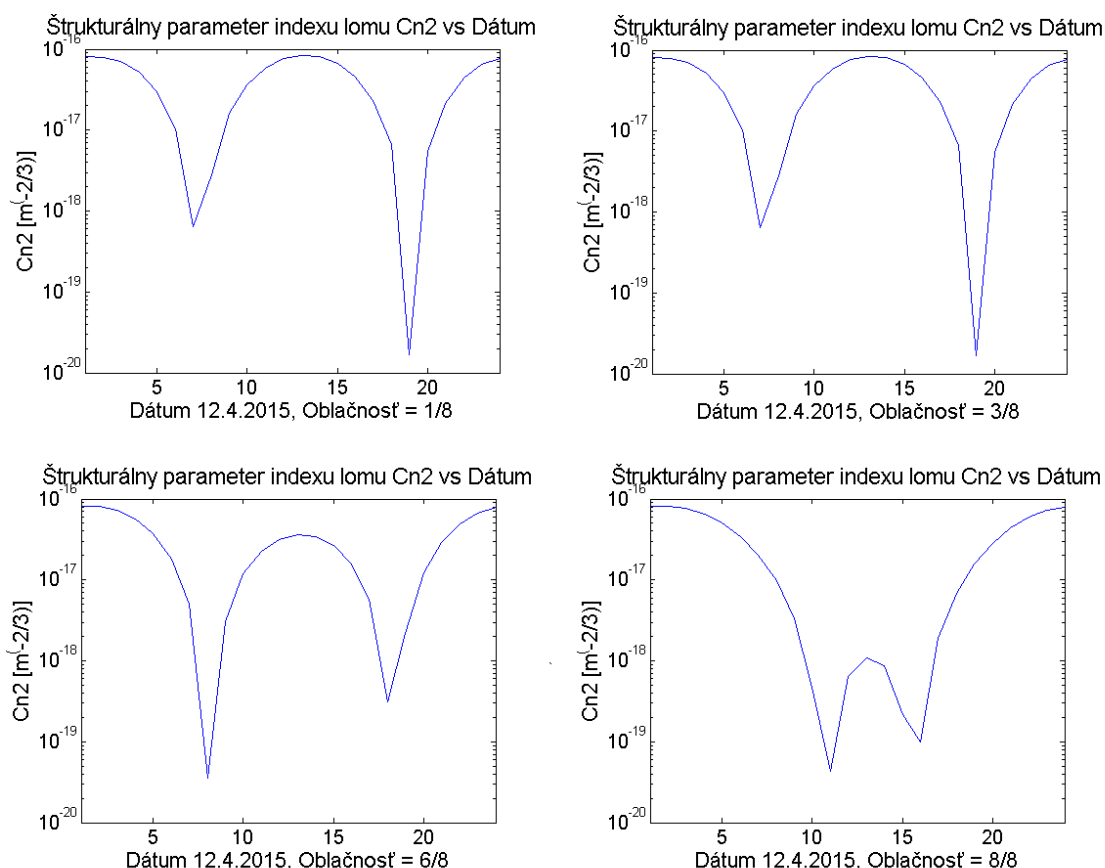
Vyhodnotenie vplyvu atmosférických javov na FSO spoj bolo realizované pomocou modelov štruktúrného parametru indexu lomu C_n^2 a porovnávania meraného RSSI (indikátor sily prijatého signálu) s meranými meteorologickými dátami. Na modelovanie C_n^2 boli vybrané 3 modely. Následne bola urobená predikcia RSSI vzhľadom na merané meteorologické dáta.

4.1 Modely štruktúrného parametru indexu lomu

Tieto modely sa líšia zložitou výpočtu. V modeli PAMELA vstupujú do výpočtu premenné, ktoré sú teoretického charakteru (deň v roku, čas dňa, zemepisná šírka dĺžka, členitosť terénu, oblačnosť) a premenné odhadnutých alebo nameraných veličín (teplota, tlak vzduchu rýchlosť vetra, výška merania, slnečné žiarenie). Z týchto premenných sa počítajú ďalšie premenné potrebné na konečný výpočet C_n^2 . V prípade M-M a eM-M modelu sú ako vstupné premenné merané veličiny (teplota, tlak, rýchlosť vetra).



Obrázok 4.1: Štruktúrny parameter indexu lomu pre dátum 3.4.2015 a rôznu oblačnosť model PAMELA



Obrázok 4.2: Štruktúrálly parameter indexu lomu pre dátum 12.4.2015 a rôznu oblačnosť
model PAMELA

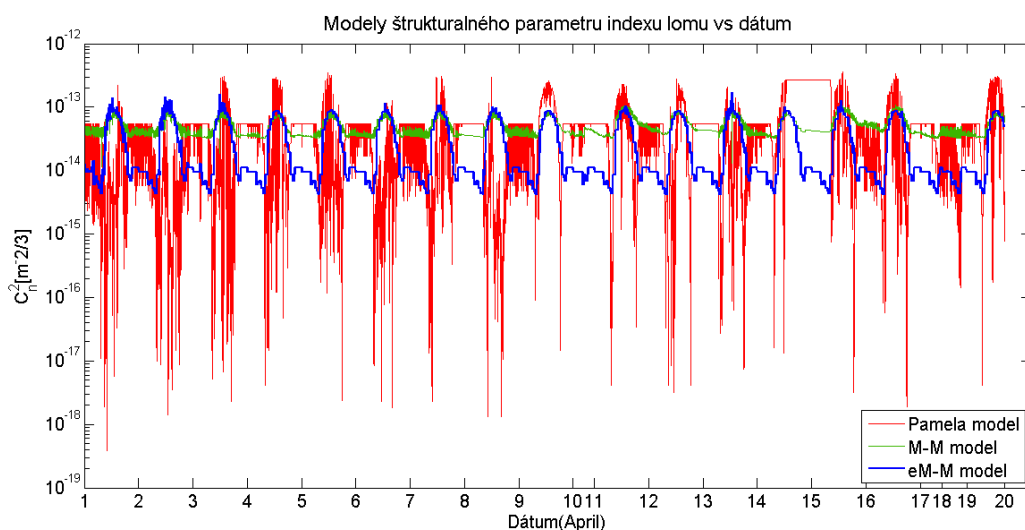
Pri výpočte C_n^2 pre tieto dva dni, boli zadané priemerné hodnoty teploty, tlaku, vzduchu, rýchlosti vetra, ostatné veličiny boli doložené podľa vzťahov v kapitole 2.7 a literatúre [8]. Pri porovnaní obrázkov 4.1a 4.2 môžeme vidieť, že najväčší vplyv na štruktúrálly parameter indexu lomu C_n^2 má oblačnosť a dátum, pre ktorý sa počíta. Pre dátum 3.4.2015 boli zadané priemerné údaje pre daný deň (teplota vzduchu = 2,83 °C, rýchlosť vetra 2,91 m × s⁻¹, tlak vzduchu 1014,99 hPa). V prípade dátumu 12.4.2015 boli zadané priemerné údaje pre daný deň (teplota vzduchu = 13,7 °C, rýchlosť vetra 1,95 m × s⁻¹, tlak vzduchu 1025,99 hPa).

Tabuľka 4.1: Priemerné hodnoty C_n^2 pre 3.4. a 12.4. 2015 pre rôzne oblačnosti

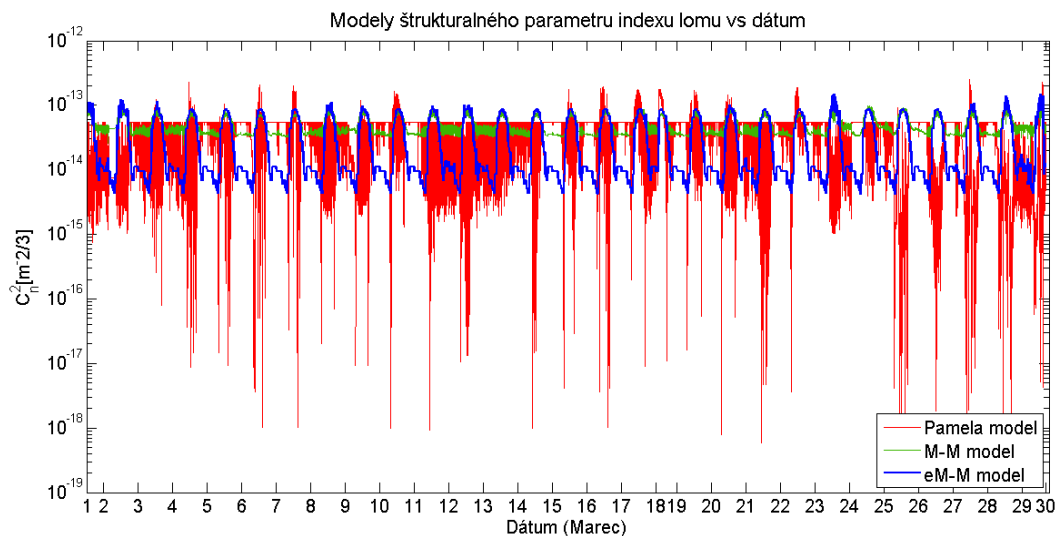
Oblačnosť	3.4.2015	12.4.2015
	C_n^2 [m ^{-2/3}]	
1/8	$3,87 \times 10^{-17}$	$7,46 \times 10^{-17}$
3/8	$3,12 \times 10^{-17}$	$3,86 \times 10^{-17}$
6/8	$3,16 \times 10^{-17}$	$2,93 \times 10^{-17}$
8/8	$4,03 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-17}$
Celkový priemer	$1,01 \times 10^{-13}$	$4,29 \times 10^{-17}$

Z tabuľky 4.1 môžeme vidieť, že v prípade oblačnosti 8/8 v 3.4.2015 bola hodnota C_n^2 $4,03 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ čo odpovedá najväčším turbulenciám v rámci tohto dňa. V prípade dňa 12.4.2015 boli hodnoty C_n^2 stabilné i pri veľkej oblačnosti.

Nasledujúci obrázok 4.3 zobrazuje porovnanie modelov PAMELA, M-M a eM-M. V tomto porovnaní sú použité reálne namerané dáta z obdobia 1.4.2015-19.4.2015. Môžeme vidieť, že modely majú maximá približne v rovnaký čas, čo potvrdzuje teóriu popísanú v minulých kapitolách, ktorá hovorí, že najväčšia hodnota štrukturálneho parametru indexu lomu C_n^2 je okolo 12 hodiny, najmenšie hodnoty hodinu po východe a západe slnka. V prípade M-M modelu a eM-M modelu je toto tvrdenie jednoznačné. Pri modeli PAMELA dochádzalo k odľahlým hodnotám, keďže používa viac meraných veličín oproti M-M modelu, a preto sú modely M-M a eM-M vyhodnotené ako jednoduchšie. V prípade eM-M modelu boli výraznejšie rozdiely medzi nočnými a dennými hodnotami C_n^2 .



Obrázok 4.3: Porovnanie modelov pre obdobie 1.4.2015-19.4.2015

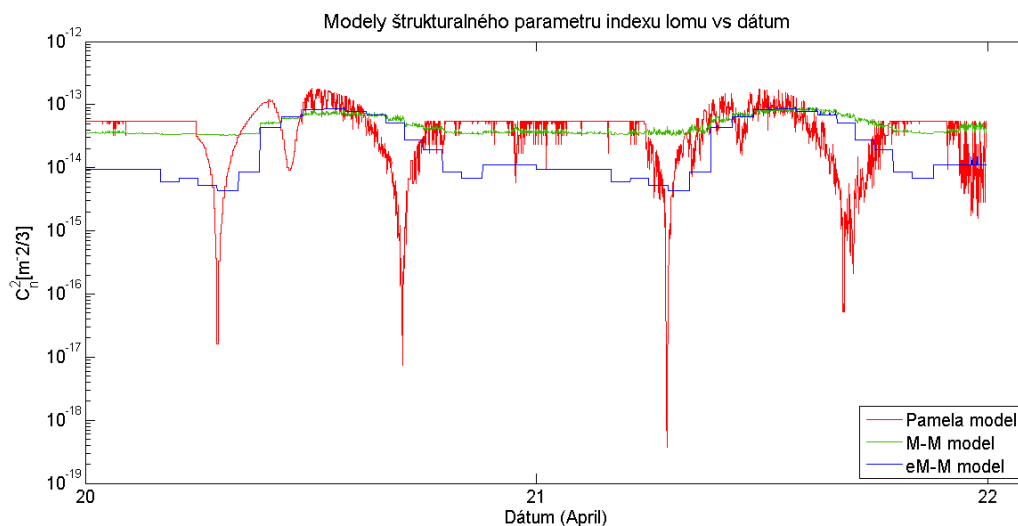


Obrázok 4.4: Porovnanie modelov pre mesiac Marec

Tabuľka 4.2: Priemerné hodnoty C_n^2 pre mesiac Marec a Apríl 2015

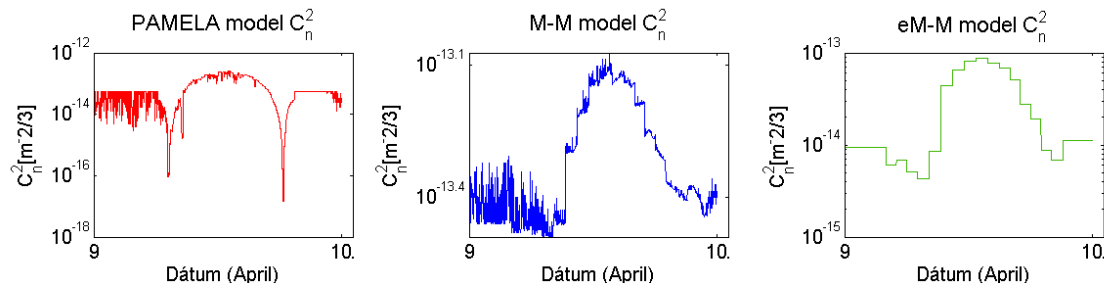
Modely	Oblačnosť	Marec 2015	Apríl
		Priemerné $C_n^2 [m^{-2/3}]$	
PAMELA	1/8-7/8	$3,59 \times 10^{-14}$	$5,49 \times 10^{-14}$
	8/8	$1,91 \times 10^{-14}$	$1,02 \times 10^{-13}$
	Celkový priemer	$3,38 \times 10^{-14}$	$6,09 \times 10^{-14}$
M-M model	-----	$1,91 \times 10^{-14}$	$4,99 \times 10^{-14}$
eM-M model		$2,79 \times 10^{-14}$	$2,94 \times 10^{-14}$

Detailnejší pohľad na prvé 3 dni v mesiaci Apríl sú zobrazené na obrázku 4.5. Z tohto obrázku môžeme usúdiť, že modely PAMELA a M-M majú nočnú časť takmer identickú, toto obdobie je stabilnejšie preto vykazuje lepšie výsledky. Modely sa líšia v dennej časti dňa, kde M-M model je stabilnejší oproti PAMELA modelu, ktorého výraznejšie ovplyvňujú vstupné premenné.



Obrázok 4.5: Porovnanie modelov pre obdobie 1.4.2015-3.4.2015

Obrázok 4.6 ukazuje presný výsledok výpočtu štruktúralného parametru indexu lomu pre modely, ktorého tvar sa najviac približuje teórii a obrázkom 4.1 a 4.2. Tento výpočet bol realizovaný pre deň 9.4.2015.



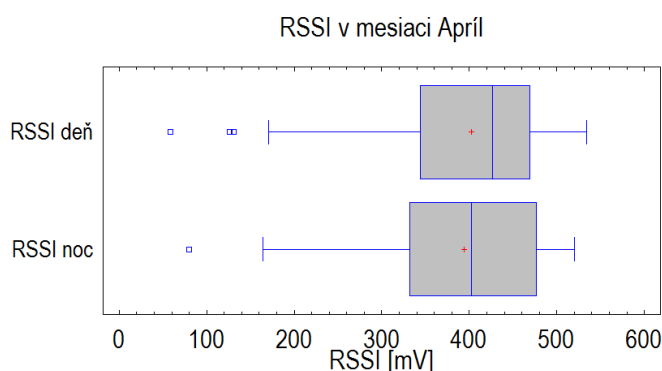
Obrázok 4.6: Porovnanie modelov pre dátum 9.4.2015

4.2 Analýza meraného RSSI

Pre zisťovanie ako sa mení RSSI v mesiaci Apríl, boli namerané dáta rozdelené na dennú časť dňa a nočnú časť dňa, a to podľa hodnoty slnečného žiarenia (nočná časť dňa = nulové slnečné žiarenie). Pri analýze boli použité dáta z mesiaca Apríl, a boli vyberané tak aby sa jednalo o interval s najmenším počtom výpadkov FSO hlavice alebo meteorologickej stanice. Pre jednotlivé dni boli urobené hodinové priemery, čo v konečnom dôsledku znamená 336 hodnôt a teda 14 dní. Jednotlivé hodnoty exploračnej analýzy [14] boli zaokrúhľované podľa smerodajnej odchýlky (smerodajná odchýlka 89,45 = zaokrúhľovanie nadol na 2 platné čísla)

Tabuľka 4.3: Exploračná analýza nameraných RSSI pre mesiac Apríl

	Apríl		
	Celkové RSSI	RSSI cez deň	RSSI v noci
Počet hodnôt	336	187	138
Aritmetický Priemer	402	402	394
Medián	421	427	402
Rozptyl	7935	8540	6967
Smerodajná Odchýlka	89	92	83
Variačný koeficient	22 %	23 %	21%
Minimum	59	59	79
Maximum	534	534	520
Rozsah	476	475	441



Obrázok 4.7: Krabicové grafy pre merané RSSI v mesiac Apríl

Z exploračnej analýzy meraného RSSI môžeme vidieť, že maximálna nameraná hodnota RSSI bola v noci. Medián a aritmetický priemer je väčší v období cez deň, čo môže byť ovplyvnené počtom vzorkou, vidíme že variačný koeficient je v prípade noci menší ako cez deň takže väčší počet hodnôt sa pohybuje okolo mediánu. V prípade rozptylu môžeme vidieť, že hodnoty pre deň a noc sú výrazne rozdielne, čo je spôsobené že v noci sú meteorologické podmienky prenosového kanála stabilnejšie, a preto nedochádzalo k častým poklesom a nárastom úrovne signálu RSSI. Z krabicových grafov na obrázku 4.9 môžeme vidieť, že dáta obsahujú odľahlé hodnoty, ktoré boli spôsobené zlými poveternostnými podmienkami, poprípade výpadkom hlavice, po skúmaní odľahlých hodnôt boli dáta spôsobené výpadkami hlavice vymazané.

V prípade testovania štatisticky významného rozdielu, je potrebné overiť normalitu na určenie testu, ktorý sa môže použiť.

H_0 = Dáta pochádzajú z normálneho rozloženia

$H_a = \neg H_0$

Podľa výsledku testu χ^2 je p-hodnota: 0. A teda môžeme povedať, že na hladine významnosti 0,05 zamietame nulovú hypotézu a teda dáta nepochádzajú z normálneho rozdelenia.

Keďže bola zamietnutá normalita dát, pre zistenie štatisticky významného rozdielu bol použitý test Wilcoxonov test, ktorý testuje rovnosť mediánov dát (zvlášť pre noc a deň).

H_0 = rovnosť mediánov

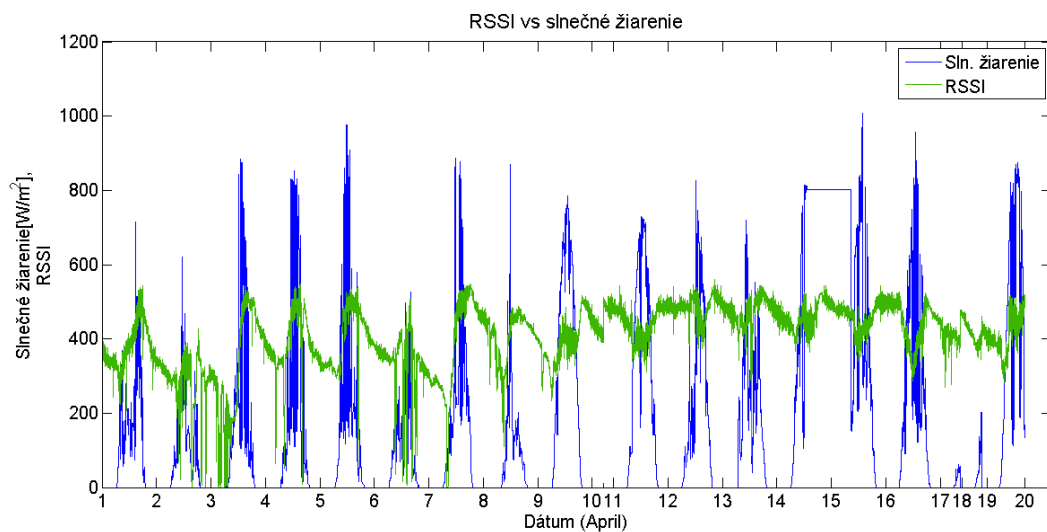
$H_a = \neg H_0$

Podľa výsledku Wilcoxonovho testu je p-hodnota:0. Je možné potvrdiť, že na hladine významnosti 5 % existuje štatisticky významný rozdiel medzi hodnotami RSSI v noci a cez deň.

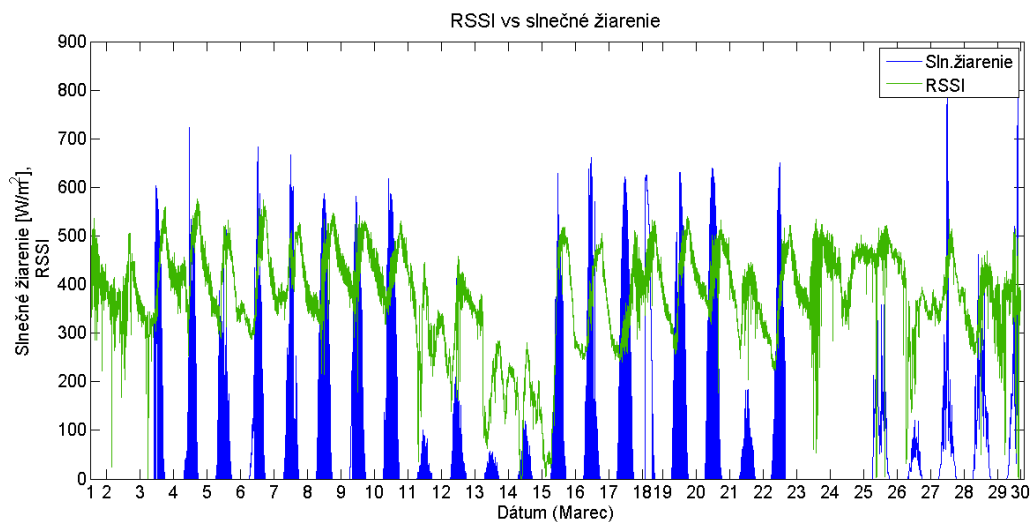
4.3 Vplyv slnečného žiarenia na RSSI

Dôležitý jav, ktorý ovplyvňuje významne merané RSSI a ostatné parametre atmosféry, (ako sú teplota, vlhkosť vzduchu, rosný bod a ďalšie) je slnečné žiarenie R [W/m^2].

Obrázky 4.8 a 4.9 zobrazujú vplyv slnečného žiarenia na merané RSSI optického spoja pre rôzne mesiace. Je možné usúdiť, že s rastúcim slnečným žiarením sa zväčšuje aj RSSI, keďže sa zvyšuje parazitné svetlo, ktoré môže ovplyvňovať prijímač.



Obrázok 4.8: Vplyv slnečného žiarenia na RSSI v mesiaci Apríl

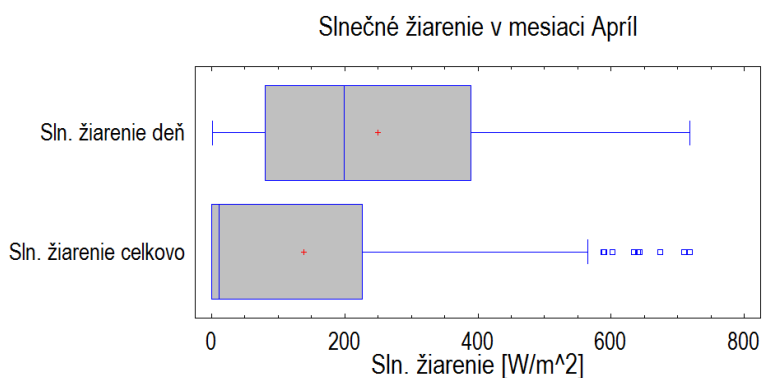


Obrázok 4.9: Vplyv slnečného žiarenia na RSSI v mesiaci Marec

Tabuľka 4.4: Exploračná analýza pre slnečné žiarenie v mesiac Apríl

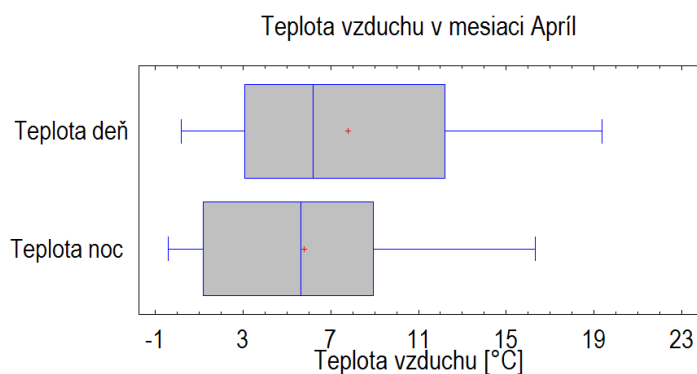
	Apríl	
	Slnečné žiarenie Celkovo	Slnečné žiarenie Deň
Počet hodnôt	336	185
Aritmetický Priemer	140	250
Medián	11	200
Rozptyl	37680	40470
Smerodajná Odchýlka	194	201
Variačný koeficient	140 %	80 %
Minimum	0	0,9
Maximum	718	718
Rozsah	718	717

V tabuľke 4.4 môžeme vidieť exploračnú analýzu pre slnečné žiarenie. Je vidieť, že skúmanie slnečného žiarenia pre celý interval je zaťažené chybou. Táto chyba je spôsobená tým, že do výpočtu vstupujú aj nulové hodnoty slnečného žiarenia, ktoré ovplyvňujú výpočty. Preto bol vytvorený interval len pre dennú časť dňa. V prípade slnečného žiarenia v rámci denných hodín na obrázku 4.10 môžeme vidieť, že 75% hodnôt je pod 400 W/m².

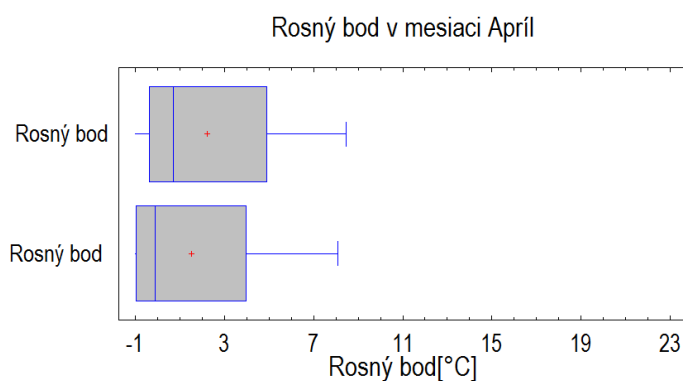

Obrázok 4.10: Krabicový graf pre slnečné žiarenie v mesiaci Apríl

4.4 Vplyv teploty vzduchu na RSSI

Hlavný parameter atmosféry, ktorý ovplyvňuje prenos optického signálu je teplota vzduchu a rosny bod, a to z dôvodu že spôsobujú zmenu indexu lomu prostredia s meniacou sa teplotou počas dňa. Môžeme povedať, že počas noci teplota nevykazuje veľký rozptyl a teda je stabilnejšia ako počas dňa, tým je aj prenosový kanál v noci stabilnejší.



Obrázok 4.11: Krabicové grafy pre porovnanie teplôt v mesiaci Apríl



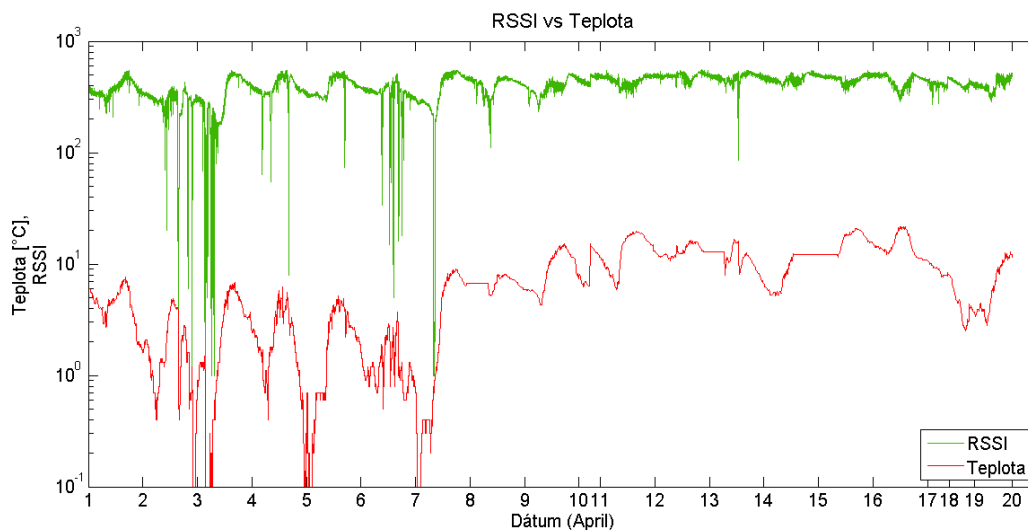
Obrázok 4.12: Krabicové grafy pre porovnanie rosného bodu v mesiaci Apríl

Z tabuľky 4.5 je zrejmé, že teplota vzduchu cez deň bola samozrejme väčšia ako v noci, čo je potvrdené aritmetickým priemerom aj mediánom. Menší rozptyl pre teplotu v noci nám potvrdzuje, že hodnota teploty v noci je stabilnejšia ako cez deň. Z obrázku 4.11 s krabicovými grafmi môžeme povedať, že 75% hodnôt cez deň respektíve cez noc je menších ako 12 °C, respektíve 9 °C.

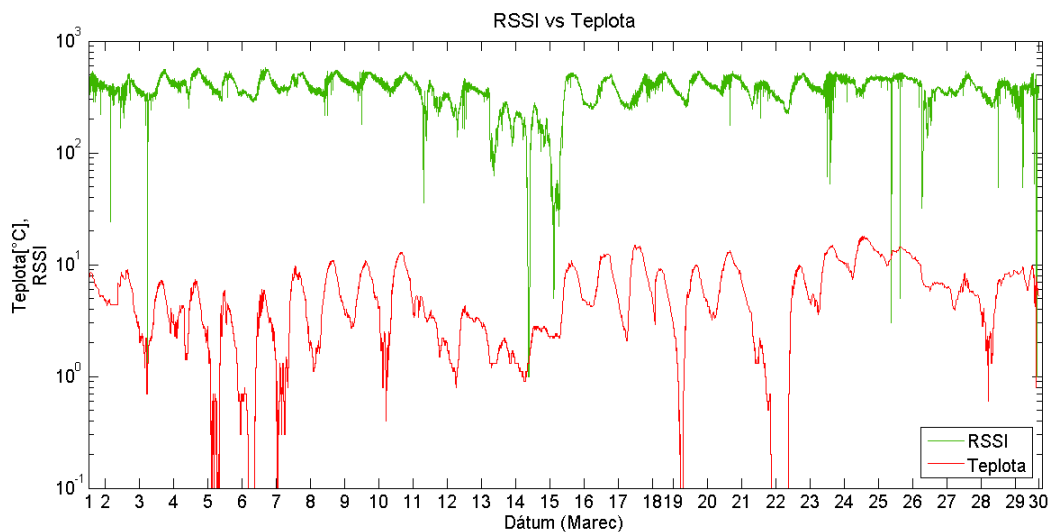
Tabuľka 4.5: Exploračná analýza nameranej teploty vzduchu pre mesiac Apríl

	Apríl			
	Teplota Deň	Teplota Noc	Rosný bod Deň	Rosný bod Noc
Počet hodnôt	192	144	192	144
Aritmetický Priemer	7,8	5,7	224	1,503
Medián	6,2	5,6	0,7	-0,1
Rozptyl	33,3	23,3	10,5	9,6
Smerodajná Odchýlka	5,7	4,8	3,2	3,1
Variačný koeficient	74,1 %	84,3 %	1414,4 %	206,8 %
Minimum	0,2	-0,4	-1,9	-1,6
Maximum	19,37	16,32	8,44	8,08
Rozsah	19,19	16,74	10,41	9,75

Na obrázku 4.13 a 4.14 je vidieť vplyv teploty vzduchu na merané RSSI FSO spoja. Tento vplyv je skreslený, keďže teplota stúpa s rastúcim slnečným žiarením.

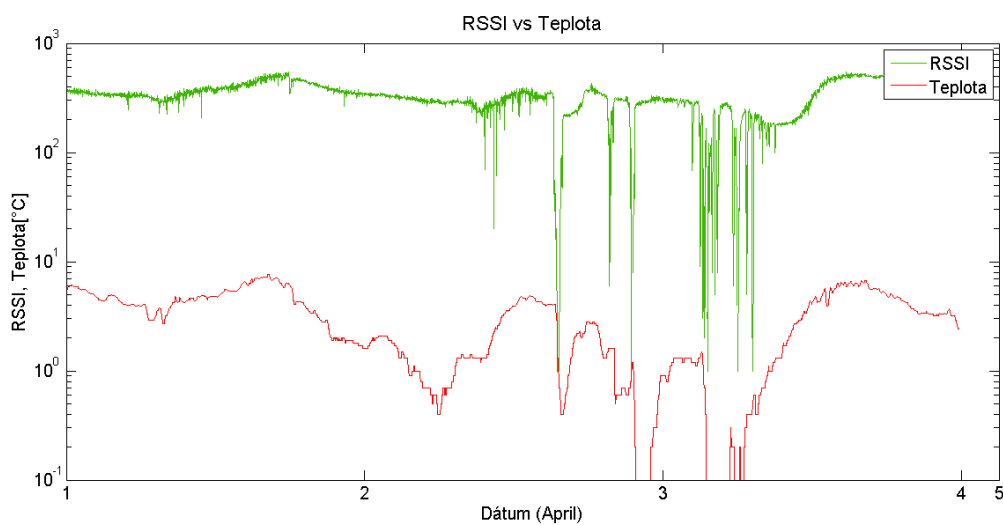


Obrázok 4.13: Vplyv teploty na RSSI v mesiaci Apríl



Obrázok 4.14: Vplyv teploty na RSSI v mesiaci Marec

Obrázok 4.15 nám potvrdzuje vplyv teploty vzduchu na RSSI. Je vidieť, že v noci pri poklese teploty klesá aj RSSI, a naopak pri náraste teploty rastie aj RSSI.

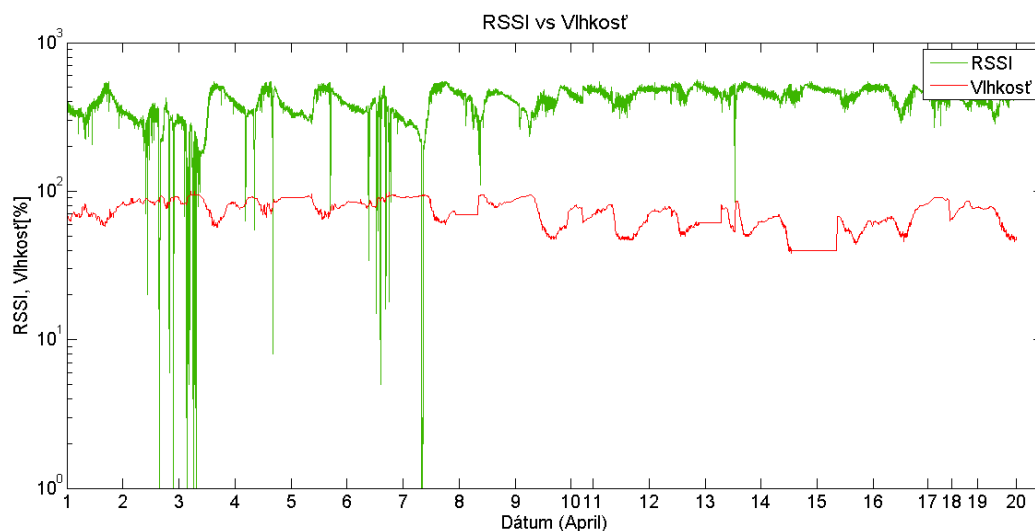


Obrázok 4.15: Vplyv teploty na RSSI pre interval 1-4. Apríla

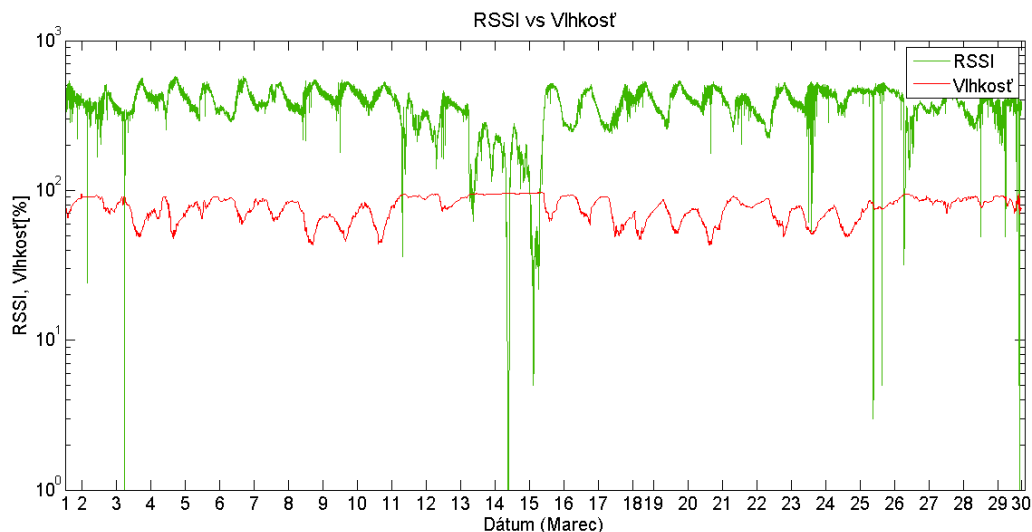
4.5 Vplyv ostatných veličín atmosféry

Ostané veličiny ovplyvňovali nepriamo merané RSSI, keďže samé sú ovplyvňované inými veličinami.

V prípade vlhkosti a tlaku vzduchu (obrázok 4.16 a obrázok 4.17) nie je výrazný vplyv na RSSI, keďže sa hodnoty RSSI menia nezávisle od vlhkosti a tlaku.



Obrázok 4.16: Vplyv vlhkosti vzduchu na RSSI v mesiaci Apríl

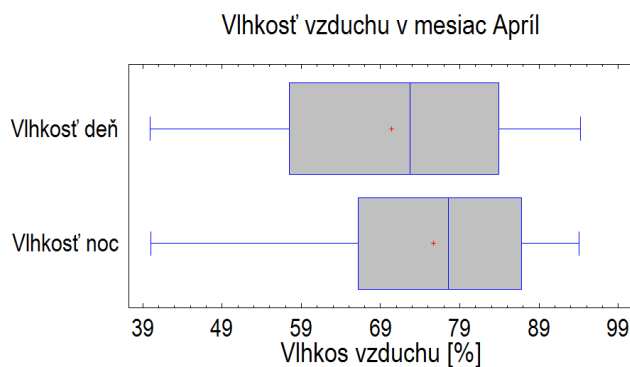


Obrázok 4.17: Vplyv vlhkosti vzduchu na RSSI v mesiaci Marec

Tabuľka 4.6: Exploračná analýza nameraných veličín vzduchu pre mesiac Apríl

	Apríl					
	Vlhkosť Deň	Vlhkosť Noc	Tlak Deň	Tlak Noc	Rýchlosť vetra Deň	Rýchlosť vetra Noc
Počet hodnôt	192	144	192	144	192	144
Aritmetický Priemer	70,0	76	1021,2	1020,9	3,5	2,5
Medián	73	77	1021,3	1022,3	3,6	2,2
Rozptyl	259	164	67,2	60,6	3,3	1,3
Smerodajná Odchýlka	16,0	12,0	8,2	7,7	1,8	1,1
Variačný koeficient	23 %	17 %	0,8 %	0,7 %	51,5 %	46,2 %
Minimum	34	40	1001,3	1000,15	0,35	0,39
Maximum	94,2	94,1	1032,3	1031,08	8,61	6,06
Rozsah	54	54	31,295	30,93	8,26	5,67

Z tabuľky 4.6 je vidieť, že v noci sú všetky veličiny stabilnejšie (menší variačný koeficient a odchýlkam, ktorá udáva ako sa dáta líšia od priemeru).



Obrázok 4.18: Krabicové grafy pre vlhkosť vzduchu v mesiaci Apríl

V prípade testovania štatisticky významného rozdielu, je potrebné overiť normalitu na určenie testu, ktorý sa môže použiť.

H_0 = Dáta (vlhkosť, rýchlosť vetra, tlak vzduchu) pochádzajú z normálneho rozloženia

$$H_a = \neg H_0$$

Podľa výsledku testu χ^2 je p-hodnota: 0. A teda môžeme povedať, že na hladine významnosti 0,05 zamietame nulovú hypotézu a teda dáta nepochádzajú z normálneho rozdelenia.

Keďže bola zamietnutá normalita dát, pre zistenie štatisticky významného rozdielu bol použitý test Wilcoxonov test, ktorý testuje rovnosť mediánov dát (zvlášť pre noc a deň).

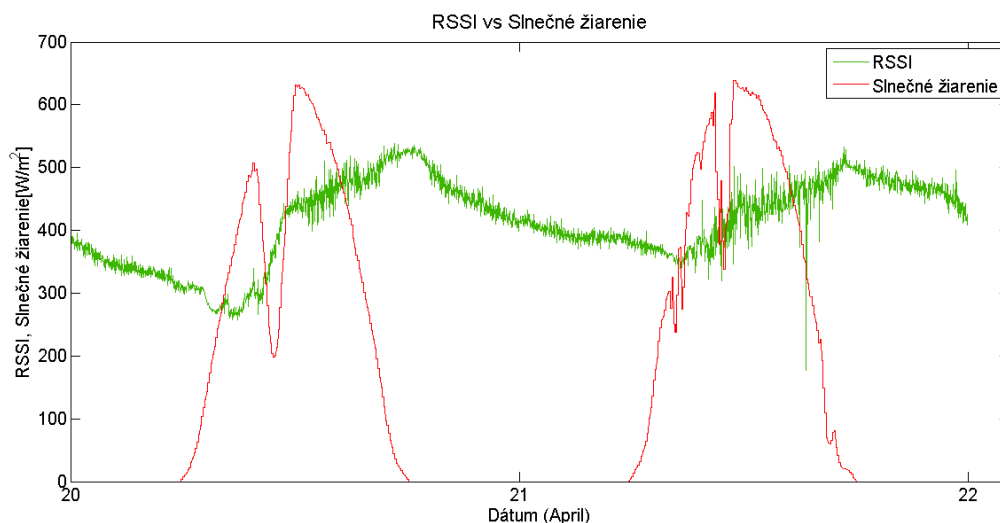
$$H_0 = \text{rovnosť mediánov}$$

$$H_a = \neg H_0$$

Podľa výsledku Wilcoxonovho testu je p-hodnota: 0. Je možné potvrdiť, že na hladine významnosti 5 % existuje štatisticky významný rozdiel medzi hodnotami jednotlivých veličín v noci a cez deň.

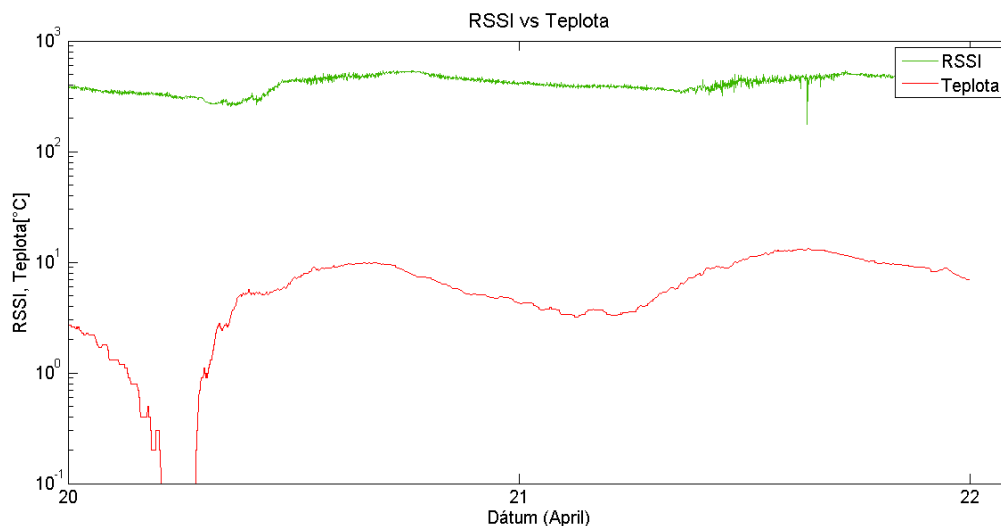
4.6 Vplyv zatmenia Slnka na RSSI

V období logovania dát bolo možné sledovať čiastočné zatmenie Slnka, ktoré bolo 20. Marca 2015. Zatmenie Slnka pre oblasť Ostravy začína približne o 9:41, vrchol zatmenia bol o 10:50, koniec zatmenia 12:01. Vo vrchole zatmenia Slnka sa dosiahlo 70 % zatmenie Slnka Mesiacom. Vplyv tohto zatmenia na logované dáta je zobrazený na nasledujúcich obrázkoch.



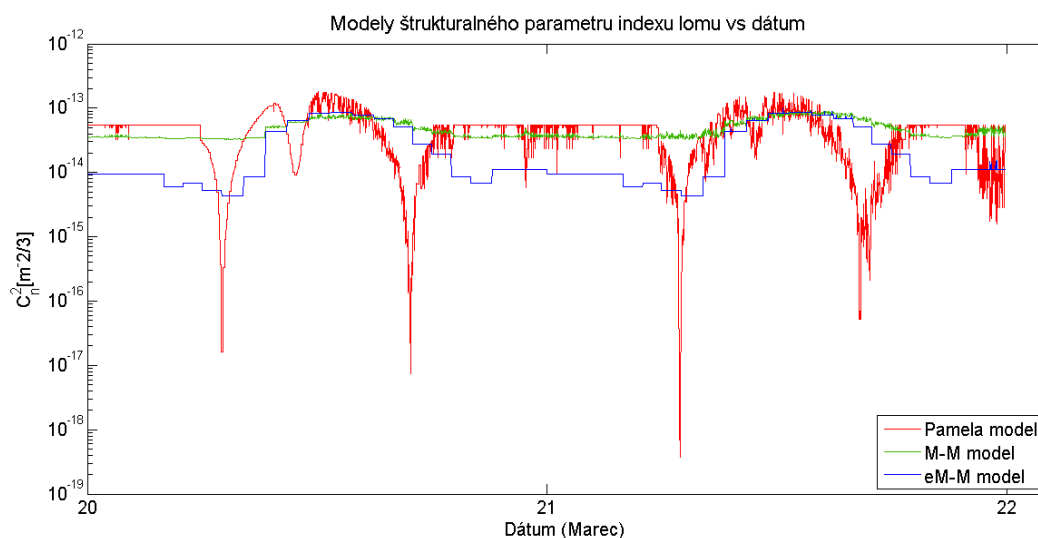
Obrázok 4.19: Merané RSSI a slnečné žiarenie v období zatmenia Slnka

Z obrázkov 4.18 a 4.19 je zrejmé, že v období začiatku zatmenia (9:40) dochádza k poklesom hodnôt slnečného žiarenia, teploty a taktiež RSSI. Po prejdení do druhej polovice zatmenia (10:50) dochádza k rastu hodnôt.



Obrázok 4.20: Merané RSSI a teplota vzduchu v období zatmenia Slnka

Zatmenie Slnka sa prejavilo aj pri výpočte štrukturálneho parametru indexu lomu, ktorý je zobrazený na obrázku 4.20. Z obrázku môžeme povedať, že model PAMELA používa pre výpočet aj slnečné žiarenie preto sa zatmenie prejavilo ako náhly pokles podobne ako u zmeny slnečného žiarenia.



Obrázok 4.21: Modely štrukturálneho parametru indexu lomu v období zatmenia Slnka

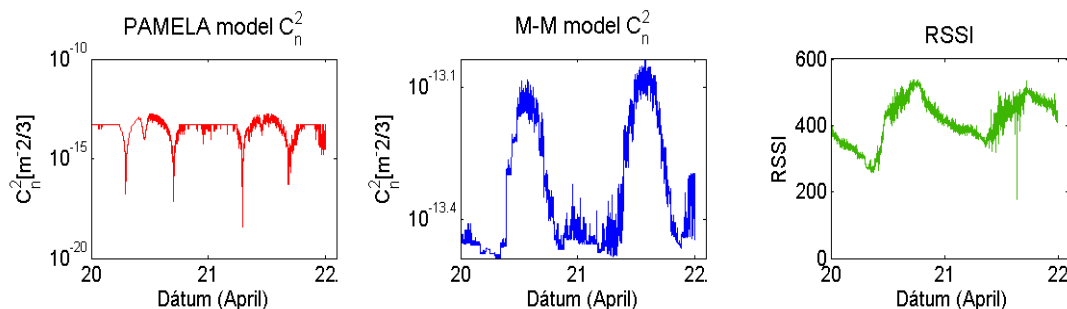
Tabuľka 4.7 zobrazuje priemerné hodnoty C_n^2 modelov PAMELA, M-M a eM-M pre deň so zatmením Slnka (20.3.2015) a bez zatmenia Slnka (21.3.2015). Môžeme vidieť, že v prípade PAMELA modelu je väčší rozdiel medzi oblačnosťou pri dni so zatmením ako pri dni

bez zatmenia, čo je spôsobené tým že PAMELA model počíta aj s nameraným slnečným žiarením oproti M-M modelu eM-M, ktoré vo výpočte slnečné žiarenie nepoužívajú.

Tabuľka 4.7: Priemerné hodnoty C_n^2 pre deň so zatmením 20.3.2015 a deň bez zatmenia 21.3.2015

Modely	Oblačnosť	Deň so zatmením	Deň bez zatmenia
		Priemerné $C_n^2 [m^{-2/3}]$	
PAMELA	1/8-7/8	$5,27 \times 10^{-14}$	$4,58 \times 10^{-14}$
	8/8	$6,86 \times 10^{-14}$	$4,97 \times 10^{-14}$
	Celkový priemer	$5,47 \times 10^{-14}$	$4,78 \times 10^{-14}$
M-M model	-----	$4,58 \times 10^{-14}$	$5,05 \times 10^{-14}$
eM-M model		$2,88 \times 10^{-14}$	$2,89 \times 10^{-14}$

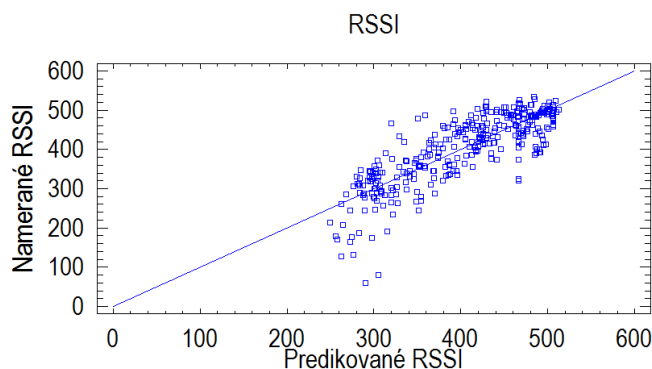
Obrázok 4.21 obsahuje grafy pre porovnanie jednotlivých modelov a nameraného RSSI v období zatmenia Slnka. Na obrázku je porovnanie dňa so zatmením Slnka 20.4. a s dňom 21.4., vidíme že v prípade RSSI v 20.4. dochádza k strmšiemu nárastu RSSI oproti dňu 21.4. čo bolo spôsobené práve zatmením Slnka.



Obrázok 4.22: PAMELA model, MM model, namerané RSSI v období zatmenia Slnka

4.7 Predikcia RSSI vzhľadom na merané meteorologické veličiny

Na predpovedanie RSSI vzhľadom na merané meteorologické veličiny bola použitá regresná analýza [14]. Touto regresnou analýzou bol testovaný vplyv jednotlivých meteorologických veličín na merané RSSI. Nasledujúci obrázok 4.23 zobrazuje graf, v ktorom sú namerané hodnoty RSSI a predikované hodnoty RSSI v rámci tejto analýzy.



Obrázok 4.23: Graf korelácie predikovaného RSSI s nameraným RSSI

V tejto analýze boli nastavené veličiny nasledovne:

- Závislá premenná = RSSI
- Nezávislé premenné = teplota, slnečné žiarenie, vlhkosť, tlak vzduchu, rosný bod, rýchlosť vetra.

Tabuľka 4.8: Výstup zo Statgraphics Analýza rozptylov

Zdroj	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-pomer	P-hodnota
Model	1773431	6	295572	109,89	0,0000
Rezíduá	884914	329	2689,71		
Celkovo	2658351	335			

R-squared = 66,771 %

Standard Error of Est = 51,8624

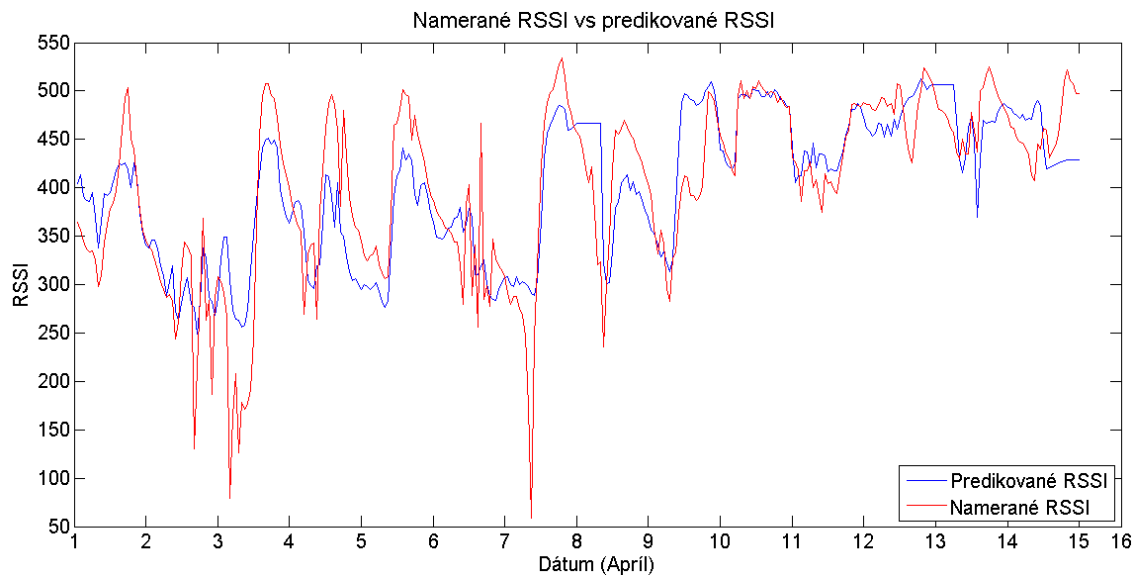
Mean absolute error = 38,607

Z tabuľky 4.8 a výslednej p-hodnoty pre F-test môžeme usúdiť, že existuje lineárna závislosť medzi meranými veličinami. Hodnota R-squared udáva na koľko percent je daný model schopný určiť hodnoty RSSI. V tomto prípade sme pomocou tohto modelu schopný určiť 66,771 %.

Následne môžeme výslednú lineárnu závislosť zapísať rovnicou:

$$RSSI = 429,818 - 77,9828 \times Temp - 0,0112219 \times Solar - 6,67757 \times Wind + 1,82659 \times Bar + 84,436 \times Dew - 20,589 \times Hum \quad (4.1)$$

Na obrázku 4.24 môžeme vidieť porovnanie nameraného RSSI s predikovaným RSSI podľa rovnice 4.1. I keď je počasie relatívne náhodné, tak daný model celkom dobre predpovedal RSSI, náhodný pokles alebo nárast RSSI bol spôsobený zmenou podmienok v prenosovom kanále, ktorým je atmosféra (napríklad hmla, prudký dážď a iné).



Obrázok 4.24: Porovnanie nameraného RSSI a predikovaného RSSI

Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo štúdium atmosférických javov, ktoré negatívne ovplyvňujú prenos optického signálu atmosférou a následne vytvorenie meracieho pracoviska pre zisťovanie vplyvu atmosférických javov na optický bezvláknový spoj. Súčasťou praktickej časti bolo taktiež vyhodnocovanie vplyvu atmosférických javov pomocou modelov štruktúrneho parametru indexu lomu.

V prvej časti práce, ktorá je teoretického charakteru, bol popísaný vývoj FSO technológie, princíp, na ktorom pracuje táto technológia a praktické použitie FSO technológie. Táto časť práce sa taktiež venovala štúdiu atmosférických javov, akými sú, rozptyly, absorpcia, turbulencie, scintilácia vplyv počasia, a ktoré negatívne ovplyvňujú prenos optického signálu prostredím akým je atmosféra. Samostatná časť tejto práce bola venovaná štruktúrnemu parametru indexu lomu, ktorý sa používa pre vyhodnocovanie vplyvu atmosférických javov na optický signál.

Druhá časť práce bola zameraná na vytvorenie meracieho pracoviska na zisťovanie vplyvov atmosférických javov na optický bezvláknový spoj. Meracie pracovisko bolo zostavené z FSO hlavice, Raspberry Pi, ktoré slúži pre logovanie dát z FSO hlavice a univerzitnej meteorologickej stanice a smerovača, ktorý zabezpečuje konektivitu medzi Raspberry Pi a užívateľom. Na Raspberry Pi boli umiestnené aplikácie, ktoré boli naprogramované pre spracovanie dát z FSO hlavice a meteorologickej stanice. Súčasťou diplomovej práce bolo taktiež vytvorenie webového rozhrania pre sledovanie a grafické vyhodnocovanie logovaných dát. Táto webová stránka bola umiestnená na webový server Raspberry Pi. Obsah tejto webovej stránky tvoria tabuľky s exploračnou analýzou logovaných dát pre rôzne intervaly výpočtu a grafické vyhodnocovanie logovaných dát v podobe grafov. Jednou z možností webovej stránky je stiahnutie logovaných dát, a to v rámci celého intervalu logovania, alebo v rámci intervalu, ktorý si definuje sám užívateľ výberom z kalendára.

Poslednou časťou diplomovej práce bolo vyhodnocovanie vplyvu atmosférických javov na optický signál. V rámci logovacej jednotky boli zaznamenávané hodnoty z FSO hlavice (RSSI) a meteorologické veličiny ako sú teplota, tlak, vlhkosť vzduchu, rýchlosť a smer vetra, rosný bod a pocitová teplota. V rámci tohto vyhodnocovania boli používané modely pre štruktúrny parameter indexu lomu a to konkrétne PAMELA model, makro-úrovňový model M-M a rozšírený makro-úrovňový model eM-M. Tieto modely sa používajú na popisanie turbulencií v atmosfére. Pomocou týchto modelov je taktiež možné určiť vplyv atmosférických javov na optický signál šírený atmosférou. Bolo zistené, že PAMELA model je citlivejší na náhodné zmeny podmienok v atmosfére. Pri porovnaní týchto modelov môžeme povedať, že modely M-M a eM-M sú jednoduchšie na výpočet, keďže obsahujú menšie množstvo vstupných premenných, čo ale neznamená, že sú menej presné ako PAMELA model. V rámci logovania dát bolo možné sledovať zmeny veličín atmosféry a RSSI počas zatmenia Slnka. Z výpočtu PAMELA modelu, ktorého vstupnou premennou je aj slnečné žiarenie sme mohli pozorovať ako sa toto zatmenie Slnka prejavilo v štruktúrnom parametre indexu lomu. Táto zmena sa

prejavila ako pokles v indexe lomu rovnako ako pokles slnečného žiarenia. Z výpočtov týchto modelov a exploračnej analýzy logovaných veličín atmosféry a RSSI môžeme potvrdiť, že podmienky prenosového kanálu akým je atmosféra je v noci stabilnejšie. Taktiež výpočty modelov potvrdzujú teóriu, že štrukturálny parameter indexu lomu má najvyššie hodnoty okolo poludnia, najmenšie hodnoty hodinu po východe a západe slnka, a stabilné hodnoty cez noc. Pri porovnávaní vypočítaných hodnôt s teóriou by sa jednalo o mierne až silné turbulencie. V rámci vyhodnocovania vplyvu atmosférických javov na RSSI, bola realizovaná predikcia RSSI pomocou regresnej analýzy. V tejto predikcii sa nám podarilo odhadnúť približne 65 % dát RSSI, čo je dobrý výsledok, keďže počasie a podmienky v atmosfére sú často náhodný jav. Pre zlepšenie predikcie RSSI by bolo nutné pozorovať veľa veličín atmosféry a sledovať dané veličiny v dlhých intervaloch.

Námetom na pokračovanie tejto práce môže byť realizovanie meracieho pracoviska pri druhej FSO hlavici, ktorá je umiestnená pri Hvezdárni Johana Palisy, a následného porovnávania nameraných dát. Taktiež by bolo možné spresniť predikciu RSSI v prípade zaobstarania rôznych meracích prístrojov ako napríklad prístroj na zisťovanie meteorologickej viditeľnosti, poprípade scintilometer, ktorý dokáže zmerať štrukturálny parameter indexu lomu a tým porovnávať s výsledkami jednotlivých modelov.

Použitá literatura

- [1] KARTALOPOULOS, Stamatios V. Free space optical networks for ultra-broad band services. Piscataway, NJ: IEEE Press, c2011, xxi, 234 p. ISBN 04-706-4775-2.
- [2] WILLEBRAND, Heinz a Baksheesh S GHUMAN. Free-space optics: enabling optical connectivity in today's networks [online]. Indianapolis: Sams, 2002, ix, 259 s. [cit. 2015-02-22]. ISBN 06-723-2248-X.
- [3] VITÁSEK, Jan. Optické atmosférické komunikace. Ostrava, 2014. Skripta. VŠB-TU Ostrava
- [4] WASICZKO, Linda Marie. Techniques to mitigate the effect of atmospheric turbulence on free space optical communication links. [online]. 2004 [cit. 2015-05-01]. Dizertační práce. Department of Electrical & Computer Engineering. Vedúci práce Professor Christopher
- [5] BOUCHET, Olivier. Free-space optics: propagation and communication [online]. 1st pub. London: ISTE, 2006, 219 s. [cit. 2015-02-19]. ISBN 19-052-0902-9.
- [6] GHASSEMLOOY, Z.W. Optical wireless communications system and channel modelling with MATLAB: propagation and communication [online]. 1st pub. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013, 219 s. [cit. 2015-02-22]. ISBN 978-143-9852-354.
- [7] RASPBERRY PI FOUNDATION. Raspberry Pi [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.raspberrypi.org/>
- [8] RICKLIN, Jennifer C., Stephen M. HAMMEL, Frank D. EATON a Svetlana L. LACHINOVA. Atmospheric channel effects on free-space laser communication. In: Journal of Optical and Fiber Communications Reports [online]. 2006, s. 111-158 158 [cit. 2015-03-15]. ISSN 1619-8638. DOI: 10.1007/s10297-005-0056-y. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10297-005-0056-y>
- [9] GRÁBNER, Martin. Atmospheric Propagation on FSO links. Telecommunication Educational Seminar [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: http://excom.vsb.cz/images/files/2015_SS/fsosemin_mg_v1_merged.pdf
- [10] BLAUNSTEIN, Nathan. Applied aspects of optical communication and LIDAR. Boca Raton: CRC Press, c2010, xvii, 262 p. ISBN 1420090402.
- [11] DÁVID, Tomáš. Testovací měření na profesionálním atmosférickém optickém spoji. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. VŠB-Technická Univerzita. Vedúci práce Ing. Jan Látal.
- [12] GITHUB, Inc. Dygraphs [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <https://github.com/danvk/dygraphs>
- [13] JQuery UI. THE JQUERY FOUNDATION. [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://jquery.com/>

- [14] LITSCHMANNOVÁ, Martina. Úvod do statistiky [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/uvod_do_statistiky.pdf. Skripta. VŠB – TU Ostrava.

Zoznam príloh

Súčasťou DP je DVD.

Adresárová štruktúra priloženého DVD:

Aplikácie/

Web Stránka/

Manuál optickej hlavice/

Matlab výpočty/